



# IMPACT DES INSTALLATIONS OSTREICOLES SUR L'HYDRODYNAMIQUE ET LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE

Y. Kervella

## ► To cite this version:

Y. Kervella. IMPACT DES INSTALLATIONS OSTREICOLES SUR L'HYDRODYNAMIQUE ET LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE. Interfaces continentales, environnement. Université de Caen, 2010. Français. NNT : . tel-00706590

**HAL Id: tel-00706590**

**<https://theses.hal.science/tel-00706590>**

Submitted on 11 Jun 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## **THESE**

présentée par

**Mr Youen KERVELLA**

et soutenue le

**le 19 mars 2010**

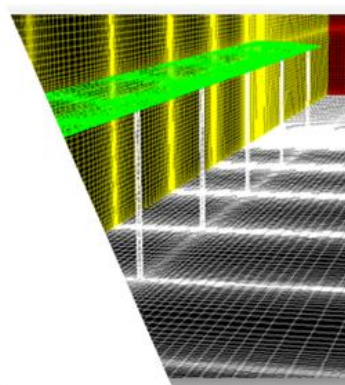
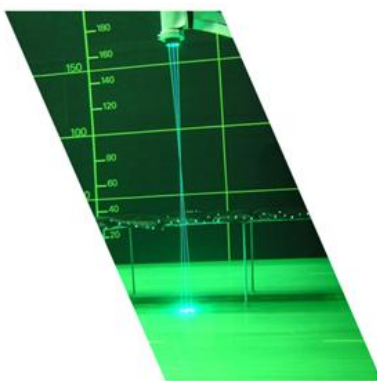
en vue de l'obtention du

**DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE CAEN**

Spécialité : Terre Enveloppe Fluide

### **IMPACT DES INSTALLATIONS OSTREICOLES SUR L'HYDRODYNAMIQUE ET LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE**

Mesures in-situ, modélisation expérimentale et modélisation numérique



#### Membres du jury :

Pr. Vincent Rey

Pr. Georges Chapalain

Pr. Jérôme Brossard

Dr. Pierre Le Hir

Dr. Jean-Marc Sornin

Pr. Patrick Lesueur

Dr. Florence Cayocca

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Membre invité

Directeur de thèse

Responsable scientifique



# Remerciements

*Dans ce manuscrit sont synthétisées trois années (et quelques mois ..) de travail, et surtout de ma vie. Ces années de thèse m'auront apporté bien plus qu'un grade ; elles m'ont permis de rencontrer de nombreuses personnes avec qui j'ai eu la chance d'apprendre, de collaborer, qui m'ont transmis leur goût pour la recherche et qui sont même devenus pour certains des amis. Ce manuscrit existe grâce à elles et je souhaite donc les en remercier.*

*Commençons par le commencement, ceux sans qui l'aventure n'aurait pas eu lieu, mes encadrants FLORENCE CAYOCCA et PATRICK LESUEUR.*

*Merci PATRICK d'avoir toujours su me guider ou me réorienter lors de nos rencontres à Caen ou de nos comités de thèse (c'est sans aucun doute grâce à toi que cette thèse n'a pas duré quatre ans), d'avoir assuré comme tu l'as fait toute la logistique administrative depuis Caen et surtout de m'avoir fait confiance tout au long de cette aventure. J'ai eu de la chance d'avoir un directeur aussi compétent et compréhensif que toi malgré la distance.*

*FLORENCE, pour toi comme pour moi c'était une première (et ce ne sera sûrement pas une dernière... pour toi !). Tu as su m'encadrer parfaitement tout en me laissant une très grande liberté de choix et d'action.. comme si tu avais fait ça toute ta vie. Tu as toujours été de bonne humeur durant ces trois années (je ne crois pas qu'on se soit trop crié dessus..), que ce soit au labo ou en mission (promis la prochaine fois, je ne prendrai pas une bavette au resto !).*

*Merci donc à vous deux pour votre encadrement ; j'ai beaucoup appris de vous et je vous promets d'utiliser au mieux ces connaissances dans ce qui suivra par la suite.*

*Mes remerciements vont ensuite vers les personnes qui ont accepté de juger ce travail et d'en être les rapporteurs : GEORGES CHAPALAIN et VINCENT REY. Merci pour vos critiques, très constructives, pour vos commentaires pertinents qui auront permis de rendre plus cohérent ce manuscrit et surtout merci pour vos encouragements.*

*Je tiens à remercier également JEROME BROSSARD, tout d'abord d'avoir accepté d'être examinateur puis Président du jury de ma thèse, et ensuite pour son accueil chaleureux au LOMC (LMPG à l'époque) au Havre pour mes premières expériences en canal à houle ! Sa pédagogie, sa curiosité, sa gentillesse et son expertise m'ont été très précieuses tout au long de cette thèse et j'espère fortement que nous aurons l'occasion de retravailler ensemble un jour.*

*Je veux ensuite adresser mes remerciements à PIERRE LE HIR : merci d'avoir accepté d'être examinateur de ma thèse, d'avoir apporté ton expérience et ton regard critique lors des*



*comités de thèse, de m'avoir permis de donner des cours et surtout merci pour ton sens de la physique et tes idées formidables (je ne sais toujours pas d'où elles te viennent...). Ça aura été un plaisir pour moi de travailler à tes côtés (et ça l'est toujours..).*

*JEAN-MARC SORNIN m'a fait l'honneur d'accepter mon invitation en tant que membre invité de ce jury de thèse. Je voulais vous remercier pour votre thèse qui aura été mon « livre de chevet » au bureau durant ces trois années mais aussi pour votre sympathie et vos questions pratiques sur ce travail le jour de la soutenance.*

*Un très grand merci à une équipe sans qui ce travail n'aurait pas eu la même saveur : L'équipe RDT/HO :*

*GREGORY GERMAIN pour son accueil, sa sympathie, ses idées, .. C'est grâce à toi si j'ai de belles publis dans ce manuscrit. Et merci aussi pour le baptême de plongée ! ; BENOIT GAURIER, le Fluent Master (et Matlab Master aussi d'ailleurs !) : merci pour ta gentillesse, pour ton aide sur Fluent et pour ces co-encadrements de stagiaires ; JEAN-VALERY FACQ, le Mac Gyver du bassin : merci pour ces belles maquettes de tables et ton efficacité lors de ces campagnes expérimentales (mon cholestérol te remercie aussi pour les sandwiches de la friterie) ; MATHIEU DEBEAUMONT pour son aide lors des mesures ; CHRISTELE LEPRETRE pour son accueil et sa gentillesse ; et enfin MARC LE BOULLUEC, pour ses conseils avisés sur le modèle analytique et lors des différents comités de thèse.*

*Je tiens à remercier chaleureusement l'équipe DYNECO/PHYSED, qui m'a accueilli durant ces trois années, et avec qui j'ai passé de formidables moments. Merci notamment à tous ceux qui ont préparé et partagé mes (NOS) missions sur le terrain :*

*PHILIPPE BASSOULLET pour ton organisation toujours parfaite et ta gentillesse ; HERVE JESTIN pour ta précision lors de la préparation et de l'installation des appareils, pour ta grande expérience et pour ta sympathie ; PHILIPPE CANN pour ton aide et ton entrain sur le terrain et dans le bureau (merci de m'avoir accueilli) ; PIERRE, FLORENCE, IMAN, KOUAME, FRANCOIS et tous ceux que j'oublie pour leur aide précieuse sur le terrain.. et bien-sûr, ROMARIC VERNEY, sa porte est sans doute celle à laquelle j'ai le plus frappé durant ma thèse, ses routines sans doute celles que j'ai le plus utilisées (à quand la V29.18 d'ailleurs ??), et ses conseils sont sans doute ceux qui m'ont fait le plus avancer. Merci à tous pour votre aide et votre générosité.*

*Merci à tous les autres membres du labo pour vos conseils, votre soutien et pour toutes ces pauses café/gâteaux/viennoiseries/galettes des rois/spécialités du bout du monde qui font la cohésion de ce labo : PASCALE, YANN-HERVE, VALERIE, FABRICE, PASCAL, FRANCK, BENEDICTE, YVES, FRED, SEB, GUILLAUME, DAVID, PIERRE, ...*

*Merci aux « djeuns » pour toutes ces discussions, ces rigolades, ces soirées :*

*JEFF (mon ingénieur informaticien préféré), FRANCOIS (mon coloc' préféré), HELOLO (quand c'est que tu reviens à l'Ifrefre ?), MATTHIEU (on se reverra bientôt je pense..), IMAN, CATHERINE, MAGALI, GUILLAUME, AMANDINE, THOMAS, MATHIEU, GILLES,*

*SYLVAIN, ROMAIN, JULIEN, GAEL, ROMAIN, MICKAEL, IMEN, FRANCOIS, CARO, XIAO MING, AKIKO AURELIE, CLEMENT, et tout ceux que j'oublie !*

*Un grand merci aussi à mon homonyme STEPHANE KERVELLA pour ces sorties sur le Bassin de Marennes-Oléron, les dégustations et les frayeurs sur le terrain et nos longues discussions pour Matlab et pour l'article (il faudrait qu'on le finisse un jour d'ailleurs..).*

*Je remercie également JULIA DAVOURIE et MATHIEU BREVERS, les deux stagiaires que j'ai eu la chance de co-encadrer avec BENOIT durant cette thèse ; merci pour votre très beau modèle, ce fut un plaisir de travailler avec vous.*

*J'adresse très volontiers mes remerciements aux deux personnes qui m'ont donné envie de faire de la recherche et qui m'ont fait confiance à un moment où j'en avais vraiment besoin : FREDERIC DIAS et DENYS DUTYKH. Sans vous, je n'aurais jamais fait de thèse.*

*J'ai d'ailleurs une petite pensée pour mes anciens professeurs de M2 (les intéressés se reconnaîtront) ; un jour, ils m'ont dit qu'ils ne voulaient pas me donner mon diplôme de Master et que je ne ferais rien de ma vie et surtout pas une thèse. Ce jour-là, je suis resté calme et ne leur ai rien répondu, mais je pense qu'aujourd'hui ce manuscrit est la meilleure des réponses à leur stupidité..*

*Merci à tous mes potes qui se sont intéressé de près ou de loin à mon travail (JULIAN et MANUE, COWBOY et DO, DOM et PAT, DAN, PILIVE et MARIE, GUIGS et VIRG, ...), qui ne savent toujours pas sur quoi je bossais mais qui ont toujours été présents et c'est le principal !*

*Enfin, un énorme Merci à ma famille : YVONNE, OLIVIER et les pépettes, MAIWENN, VINCENT, MAEVA, LE MATT (merci pour les galets mon p'tit beauf!) et bien-sûr ma MERE, ma SOEUR et ma GRAND-MERE qui me soutiennent depuis le début et qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui. J'ai aussi une pensée émue pour mon PERE et mon GRAND-PERE qui ont toujours cru en moi mais sont malheureusement partis trop tôt..*

*La meilleure pour la fin : ma p'tite CLAIRE. Merci d'avoir supporté tout ça (les aller-retours, les semaines d'absence, les fatigues, ..) et surtout d'avoir mis entre parenthèses ta carrière et d'avoir tout quitté pour me suivre au bout du monde.. Promis, je te revaudrai ça !*

*Tu m'as fait durant cette thèse le plus beau des cadeaux : notre petit OWEN. Merci ma belle !*



# SOMMAIRE

Avant-propos .....	11
Chapitre I: Introduction .....	15
Chapitre II: Impact des installations ostréicoles sur les vagues .....	27
II.1. Echelle locale : étude des phénomènes en champ proche .....	28
II.1.1. Mesures in-situ .....	28
II.1.2. Approche expérimentale .....	59
II.1.2.1. Position du problème. Synthèse bibliographique .....	59
II.1.2.2. Expérience de visualisation .....	62
II.1.2.3. Conclusions .....	77
II.1.3. Etude numérique .....	78
II.1.3.1. Synthèse bibliographique .....	78
II.1.3.2. Modèle analytique de la table sous la houle .....	80
II.1.3.3. Vers un modèle numérique plus complet de la table sous la houle .....	83
II.2. Moyenne échelle : compréhension des phénomènes à l'échelle d'un parc ostréicole .....	86
Chapitre III: Impact des installations ostréicoles sur les courants .....	91
III.1. Echelle locale : étude des phénomènes en champ proche .....	92
III.1.1. Mesures in-situ .....	92
III.1.2. Approche expérimentale .....	97
III.1.2.1. Le bassin de Boulogne-sur-Mer et ses moyens de mesures .....	97
III.1.2.2. Les maquettes de table à huîtres .....	102
III.1.2.3. Le protocole expérimental .....	107
III.1.2.4. Les résultats expérimentaux .....	110
III.1.2.5. Conclusions .....	139
III.1.3. Etude numérique .....	140
III.2. Moyenne échelle : compréhension des phénomènes à l'échelle d'un parc ostréicole .....	172
Chapitre IV: « For those who like sediments » .....	185
IV.1. Impact local des structures sur la turbidité .....	188

IV.2. Contrainte critique de cisaillement vs hydrodynamique à moyenne échelle .....	199
IV.2.1. Analyse granulométrique .....	200
IV.2.2. Calcul de la contrainte critique de cisaillement .....	203
IV.2.3. Atténuation de la tension de cisaillement par les structures et conséquences.....	205
IV.3. Impact local des structures sur l'altimétrie du sédiment .....	207
IV.3.1. Contexte et stratégie de l'étude .....	207
IV.3.2. Caractéristiques des sédiments et altimétrie .....	210
IV.3.2.1. Caractéristiques des sédiments superficiels :.....	210
IV.3.2.2. Variations altimétriques de l'interface sédimentaire (figure IV.20): .....	212
Chapitre V: Vers une modélisation numérique à l'échelle d'une baie .....	217
V.1. Modèle courantologique.....	219
V.1.1. Equations du modèle .....	219
V.1.2. Frottement sur le fond .....	220
V.1.3. Introduction de différentes rugosités et résultats .....	222
V.2. Modèle de vagues .....	230
V.3. Modèle de transport sédimentaire.....	239
V.4. Résultats .....	242
Chapitre VI: Conclusions générales .....	249
Bibliographie.....	255
Annexes .....	281
Annexe 1 : modèle analytique de plaque immergée sous la houle (calculs et routines Matlab) .....	282
Annexe 2 : plans des maquettes ostréicoles .....	305
Annexe 3 : poster présenté au Salon de l'Ostréiculture 2009 .....	308
Annexe 4 : Article pour les Journées de l'Hydraulique SHF 2009.....	309
Annexe 5 : Un Nouveau Chapitre de la Thèse (ABG) .....	316





# Avant-propos





Les sites où sont développées les activités conchyloles, c'est-à-dire les cultures ostréicoles et les cultures mytilicoles, sont souvent des zones abritées, telles que les baies et les bassins, qui facilitent l'exploitation des mollusques.

Ces zones abritées, présentant par définition des conditions hydrodynamiques « calmes », sont des zones propices à une sédimentation vaseuse importante.

De surcroît, les tables à huîtres (nous nous focaliserons dans cette étude sur la méthode de culture d'huîtres sur tables, dite « culture surélevée » et connue comme étant celle ayant l'impact le plus notable sur la sédimentation (Sornin, 1981)), du fait de leur géométrie, constituent des obstacles artificiels pouvant perturber l'écoulement des courants de marée et la propagation des vagues, et ainsi modifier le transport sédimentaire.

De ces deux phénomènes, il résulte des envasements locaux parfois très prononcés et menaçants pour l'activité ostréicole.

A ces causes d'origine physique, il convient d'ajouter d'autres causes, notamment d'origine biologique, qui tendent à accroître ces envasements (ces dernières ne seront pas étudiées dans le contexte de cette thèse).

Divers schémas de restructuration sont proposés localement afin de remédier à cette situation mais à l'heure actuelle, aucune étude précise des modifications hydrodynamiques inhérentes à ces restructurations n'a été réalisée et il est donc impossible de prédire leur efficacité à long terme.

Ce projet de thèse, partie intégrante de l'action PISTOLE (Programme de l'Impact Sédimentaire des insTallations conchylicOLEs) de l'Ifremer, doit permettre de quantifier finement les interactions entre les tables ostréicoles et l'hydrodynamisme local, à petite échelle spatiale, de déterminer leur domaine d'influence et d'évaluer les modifications sédimentaires induites à proximité des tables et à l'échelle d'une baie. Pour ce faire, ce projet s'appuie sur des mesures *in-situ*, des mesures en bassin et des modèles numériques.

A terme, il sera ainsi possible de prendre en compte ces structures dans un modèle de plus grande emprise spatiale et de proposer des solutions cohérentes d'aménagement aux professionnels du secteur. Cette thèse contribuera donc à permettre à la fois une gestion intégrée du domaine public maritime et le développement durable des activités ostréicoles.



# Chapitre I: Introduction

En 1979, Sornin (Sornin, 1979) dressait un inventaire des zones conchylicoles du littoral français affectées par des problèmes d'envasement (figure I.1).

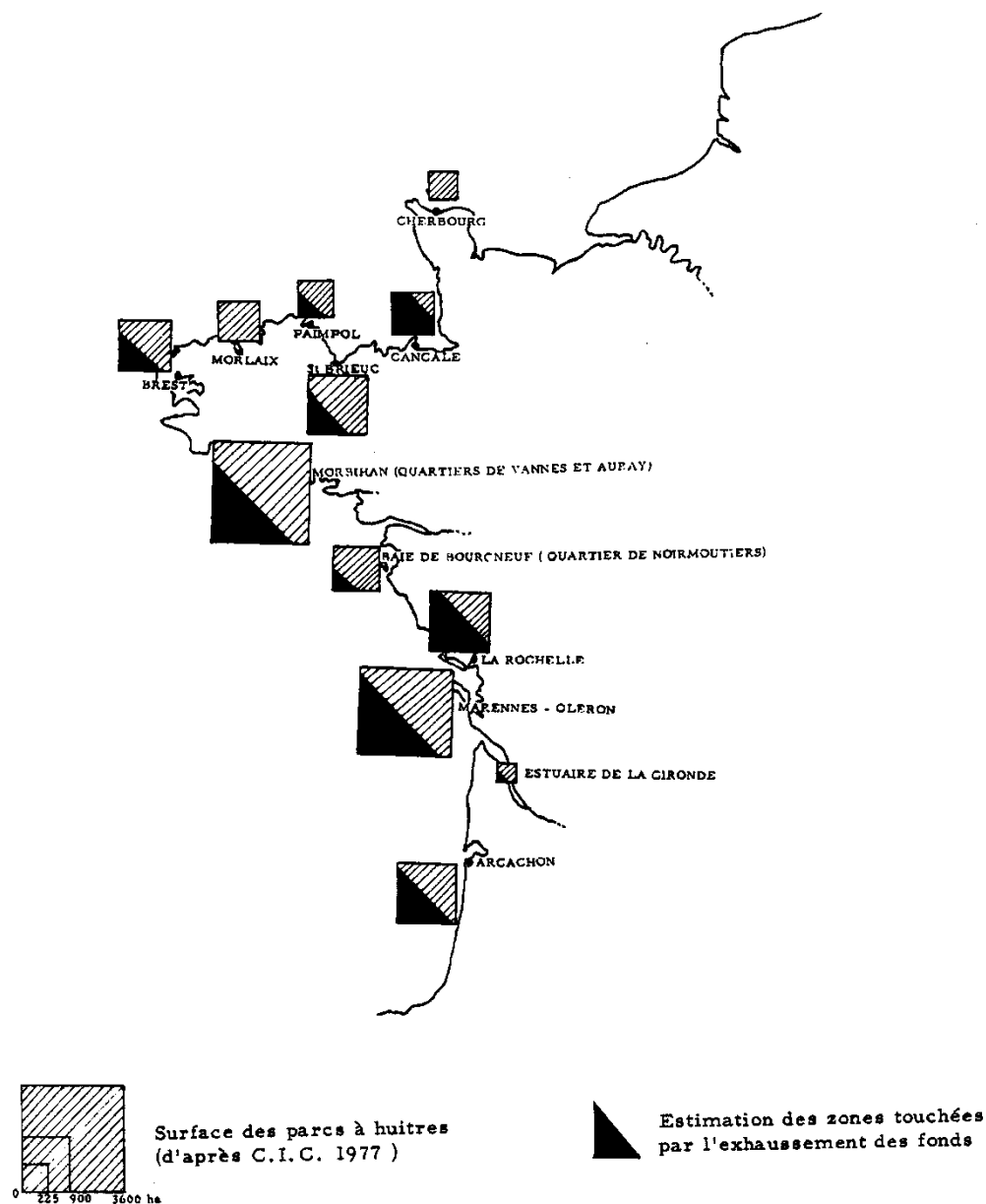


Figure I.1: les problèmes d'exhaussement des fonds et l'ostréiculture française en 1979, d'après (Sornin, 1981).

Les conclusions de cette enquête étaient que de nombreux sites ostréicoles (notamment en Ile et Vilaine et en Charente Maritime) étaient menacés par des exhaussements importants (de nature vaseuse) et étaient sujets soit à l'abandon, soit à un déplacement des installations.

Un nouvel inventaire, non exhaustif, des pratiques conchylicoles françaises a été réalisé en 2007 dans le cadre de l'action PISTOLE de l'Ifremer. Cet inventaire a été mené en collaboration avec les laboratoires côtiers de l'Ifremer, en prenant contact avec les Sections Régionales de Conchyliculture et/ou des exploitants dans les secteurs de la Baie des Veys, de la Baie du Mont Saint-Michel, de la rivière d'Auray/Quiberon, de la Baie de Bourgneuf et du Bassin de Marennes-Oléron. Les états des sols des zones conchylicoles de la Baie des Veys, de la Baie du mont Saint-Michel et du Bassin de Marennes-Oléron, sont présentés ci-dessous :

- Baie des Veys :

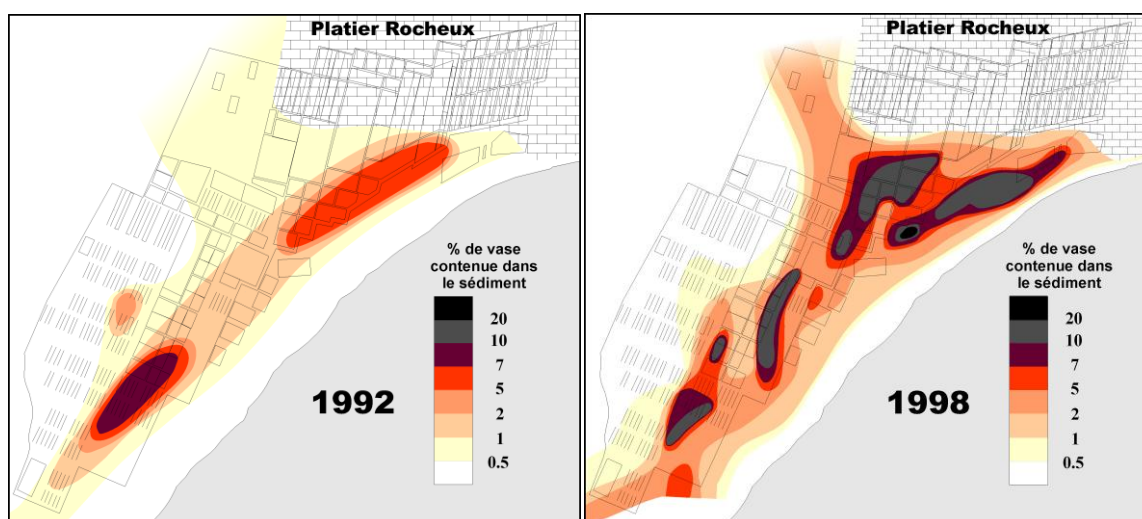


Figure I.2 : Teneur du sédiment en particules fines en Baie des Veys en 1992 et en 1998, d'après (Sylvand, 1995) dans (Ropert, 1999).

En Baie des Veys, la réactualisation de la cartographie sédimentaire de la zone conchylicole a permis de faire ressortir une forte tendance à l'envasement et à l'affinement des particules (Ropert et al., 2007) en zone ostréicole, notamment sur le secteur de Géfosse, le plus sensible du bassin en terme d'expression de la mortalité (Sylvand et al., 2003; Timsit et al., 2003).

De 1992 à 1998, la fraction de particules fines est passée de 7 % à 20 % à l'intérieur de la zone conchylicole (figure I.2). Seule la partie ouest est préservée de par son hydrodynamisme important.

D'après Ropert (1999): « Malgré sa situation relativement exposée en ouverture de baie, la zone conchylicole développe un envasement anormal pour ce type de milieu ouvert et plus généralement sableux. La responsabilité de la présence des structures conchylicoles n'est pas à écarter (Sornin, 1981) cependant, cette

évolution est ici particulièrement rapide et reste, sans nul doute, un des aspects les plus préoccupants pour l'avenir de la conchyliculture de ce secteur. »

- Baie du Mont Saint-Michel :

L'activité ostréicole en Baie du Mont Saint-Michel est concentrée dans sa partie occidentale, avec les parcs de Cancale et le parc du Vivier sur Mer, récemment implanté (figure I.3).

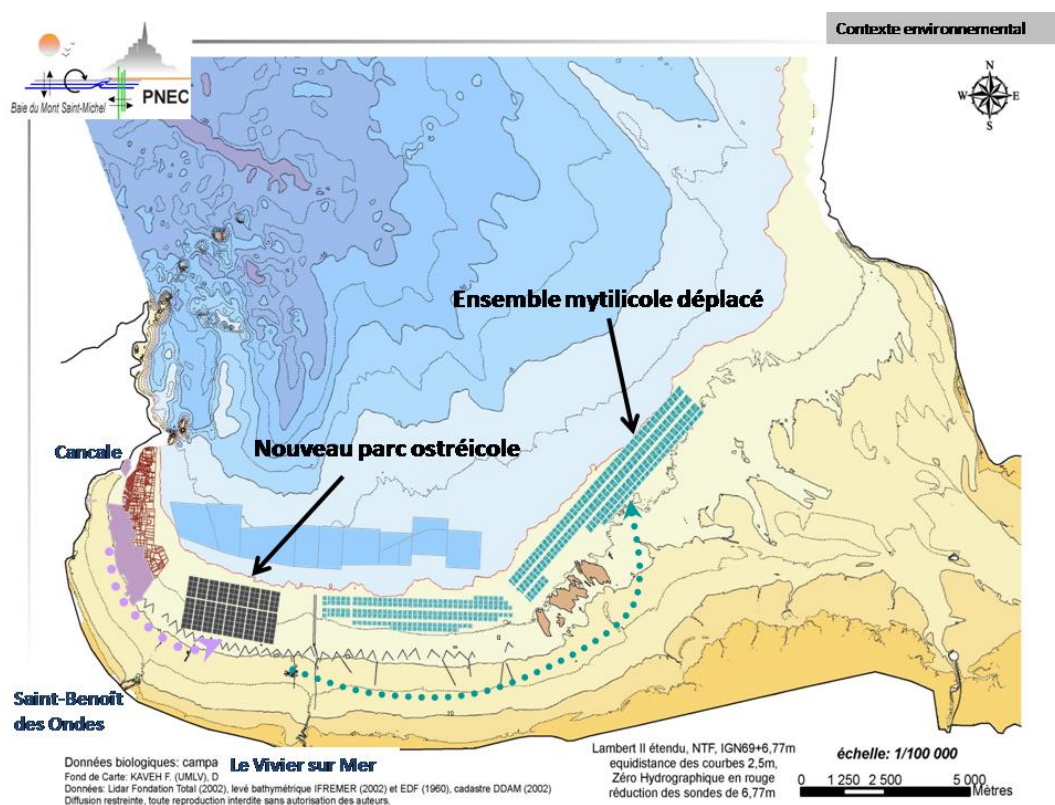


Figure I.3 : Restructuration conchylicole dans la Baie du Mont Saint-Michel (PNEC Baie du Mont Saint-Michel)

Depuis une dizaine d'années, les parcs ostréicoles de Cancale présentent des situations extrêmes d'envasement dans les parcelles situées le plus haut sur l'estran (figure I.4). Plus on descend sur l'estran, plus les courants de marée sont forts et plus le sédiment est sableux (les courants de marée s'amortissant par frottement sur le fond de l'estran quand la tranche d'eau diminue).



*Figure I.4: Envasement extrême dans les parcelles situées en haut de l'estran à Cancale (2002)*

Une restructuration de grande ampleur du cadastre conchylicole, orchestrée par la Section Régionale Conchylicole de Bretagne Nord, a eu lieu entre 2003 et 2005.

Elle a permis le déplacement d'une partie de l'activité ostréicole du sud de Cancale, où les conditions étaient devenues trop difficiles, vers un ancien espace mytilicole situé au sud-ouest de la baie, entre Saint-Benoît des Ondes et le Vivier sur Mer.

Après trois années d'exploitation seulement, un envasement local est observé dans la partie sud (la partie située le plus haut sur l'estran) de ce nouveau parc ostréicole. Les dépôts constitués de vase molle à fluide peuvent atteindre 20 cm (figure I.5).



*Figure I.5: Envasement local au sud du nouveau parc ostréicole du Vivier-sur-Mer.*



- Bassin de Marennes-Oléron :

La pression des professionnels du Bassin pousse à l'augmentation du nombre de tables. Mais de nombreux problèmes d'envasement sont observés :

- Sur le site de Perron (point n°1 sur la figure I.6), où des tables ont été installées en 1990, l'ampleur de l'envasement vient de conduire les Affaires Maritimes à mettre un terme à l'exploitation de ce banc.
- Le banc de Lamouroux (point n°2 sur la figure I.6, figure I.7) est assujéti à une réglementation d'enlèvement des concessions : les élevages sont mis en place en juin et retirés à la fin du mois de novembre. Ceci permet de limiter les envasements prenant place sur ce banc (cf chapitre IV partie altimétrie). Un envasement saisonnier est néanmoins observé (Kervella, 2010a) à l'instar du site des Doux-bas (où les tables sont orientées orthogonalement au courant): sédiment vaseux en été (figure I.7) et sableux en hiver.
- Le banc d'Agnas (point n°3 sur la figure I.6) présente des sédiments vaseux dans sa partie sud et des sédiments sableux dans sa partie nord.
- Dans le sud du bassin, notamment sur le site de Perquis (point n°4 sur la figure I.6) qui a été restructuré et qui bénéficie d'un apport sableux par sa partie sud, une sédimentation vaseuse limitée est observée.

Des cartes de répartition des faciès sédimentaires superficiels de la baie de Marennes-Oléron, où l'on retrouve ces principaux résultats, sont dressées dans la thèse de Stéphane Kervella (Kervella, 2010a).

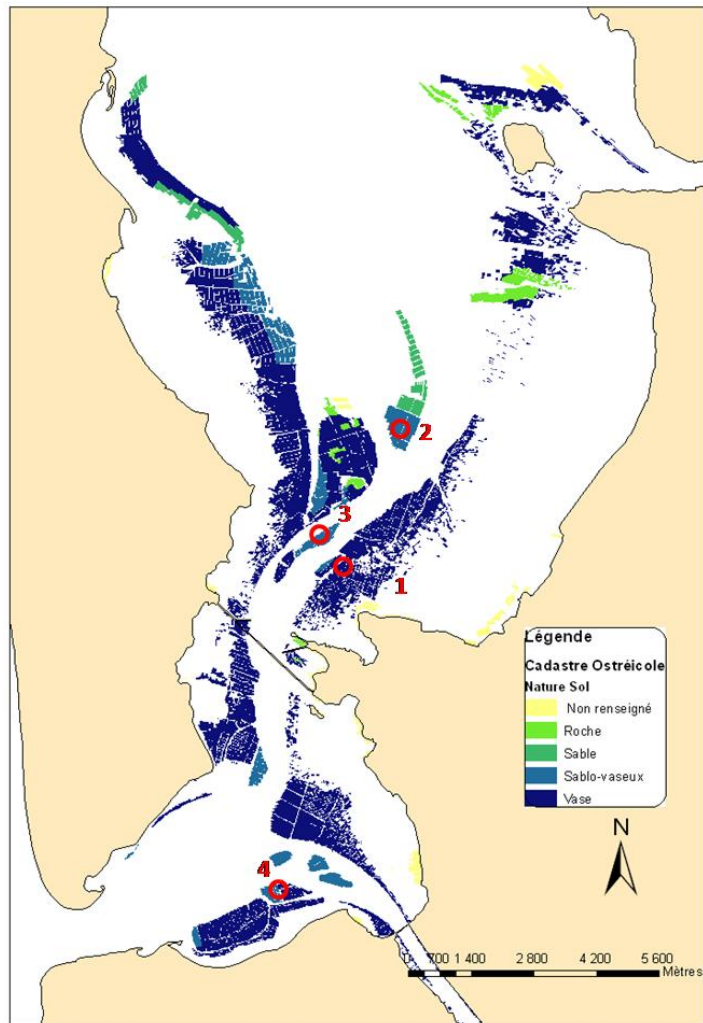


Figure I.6 : Cadastre conchylicole et nature des sols dans le bassin de Marennes-Oléron (source : O. Le Moine, Ifremer)



Figure I.7: Dépôt vaseux en zone ostréicole sur le site des Doux (à gauche) et début d'envasement sur le banc ostréicole de Lamouroux (à droite).

### Conclusions de cet inventaire :

Des envasements importants sont donc toujours présents sur de nombreux sites du littoral français, en relation avec la conchyliculture. Les structures ostréicoles participent clairement aux envasements observés localement mais il est difficile de déterminer leur rôle à l'échelle de la baie ou du bassin concerné.

Il est donc essentiel de comprendre les phénomènes inhérents à la culture surélevée à différentes échelles spatiales. Dans la suite de cette étude, nous discernerons donc trois échelles différentes :

- L'échelle « locale », où l'impact en champ proche d'une ou deux tables ostréicoles est étudié.
- L'échelle « globale », où le parc ostréicole, souvent composé de plusieurs dizaines voire centaines de tables, est étudié dans son ensemble.
- La « grande » échelle, où l'impact d'un parc ostréicole sur une baie ou un bassin est étudié.

Avant d'aller plus loin, décrivons plus en détails ce que l'on entend par « culture surélevée » : contrairement à ce qui est pratiqué par les ostréiculteurs utilisant la technique de culture « à plat », où les huîtres sont posées sur le sol et sont donc en contact direct avec le substrat, l'élevage des mollusques se fait dans des poches grillagées en plastique, retournées périodiquement afin de donner à l'huître une forme ronde et régulière, et positionnées sur des structures métalliques appelées « tables » (figure I.8).



*Figure I.8 : Structures ostréicoles dans la Baie du Mont Saint-Michel (à gauche) et dans le bassin de Marennes-Oléron (à droite).*

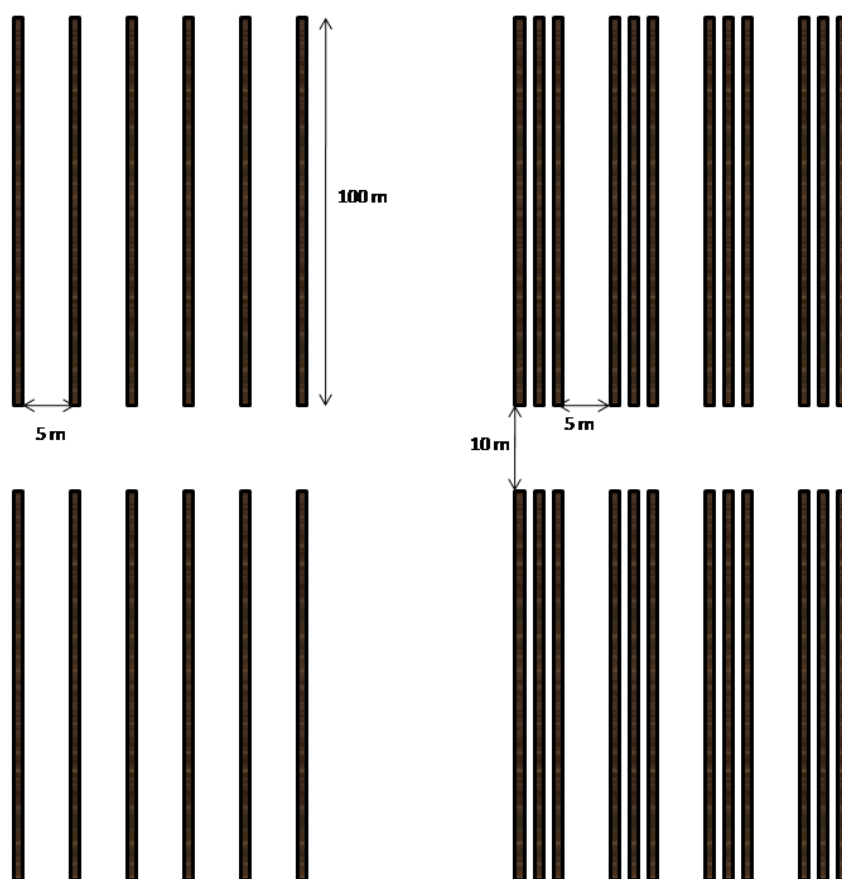
Ces structures (tables+poches) ont généralement une longueur de l'ordre de 100 mètres, une largeur de 1 mètre et une hauteur caractéristique de 50 à 90 centimètres (la hauteur minimale est fixée par arrêté préfectoral).

Sur le terrain, la disposition, parfois très chaotique, de ces structures est de plus en plus réglementée. Dans le cadre des récentes restructurations (en Baie du Mont Saint-Michel par exemple), les structures sont alignées avec la direction principale des courants, afin de limiter les phénomènes d'envasement.

Les tables sont généralement séparées les unes des autres par des allées de circulation de 5 mètres de largeur (figure I.9 gauche).

Sur certains sites, les tables sont regroupées par « lotissement » : 2, 3 voire 4 tables sont espacées par une allée de 1 mètre de large (permettant l'intervention à pied des ostréiculteurs). Ces lotissements sont séparés les uns des autres par une allée de circulation de 5 mètres (figure I.9 droite).

Les tables ainsi réunies forment un « parc ostréicole », dont l'emprise spatiale peut atteindre plusieurs km<sup>2</sup>.



*Figure I.9 : Exemples de disposition des structures ostréicoles dans la Baie du Mont Saint-Michel (à gauche) et dans le Bassin de Marennes-Oléron (à droite)*

Les observations réalisées sur différents sites ostréicoles du littoral français montrent qu'il est difficile de généraliser les manifestations du phénomène d'envasement local : parfois l'envasement se traduit par la formation de « buttes » de vase sous les tables, parfois ces « buttes » sont localisées dans les allées.

D'autre part, le facteur hydrodynamique gouvernant ce phénomène d'envasement est difficilement identifiable.

Il est donc essentiel de déterminer l'impact des structures sur chaque forçage hydrodynamique, ainsi que l'effet de l'orientation des structures vis-à-vis de ce dernier, afin de comprendre l'origine des envasements observés.

Dans ce travail, nous aborderons ainsi en premier lieu l'impact des installations ostréicoles sur l'hydrodynamique, c'est-à-dire sur les vagues (chapitre II) et sur les courants (chapitre III). Les forçages hydrodynamiques sont en effet le « moteur » de la dynamique sédimentaire en présence et il convient donc de bien comprendre dans un premier temps les modifications de l'écoulement inhérentes aux structures ostréicoles. L'impact des installations sur ces deux forçages est étudié tout d'abord à l'échelle locale, par le biais d'approches complémentaires : mesures in-situ, modélisation expérimentale (en bassin d'essais ou en canal à houle) et modélisation numérique ou analytique, puis à l'échelle globale par mesures in-situ.

Dans un second temps, nous nous efforçons de relier les conclusions de ces études hydrodynamiques au sédiment (chapitre IV). A l'échelle locale, nous évoquons successivement les modifications en termes de turbidité et d'altimétrie du sédiment, et à l'échelle globale, les modifications de la contrainte critique de cisaillement sur le fond sont reliées à la granulométrie du site étudié.

Enfin, une modélisation à l'échelle d'une baie, calibrée par les résultats hydrodynamiques obtenus à l'échelle globale, est menée afin de déterminer l'impact à long terme d'un parc ostréicole sur la dynamique sédimentaire (chapitre V).





# Chapitre II: Impact des installations ostréicoles sur les vagues

## Contenu :

### **Echelle locale : étude des phénomènes en champ proche**

- *Mesures in-situ*
- *Approche expérimentale*
- *Etude numérique*

### **Moyenne échelle : compréhension des phénomènes à l'échelle d'un parc ostréicole**



## *II.1. Echelle locale : étude des phénomènes en champ proche*

Cette partie relate les mesures in-situ, les études expérimentales ainsi que la modélisation analytique ou numérique visant à déterminer l'impact des structures ostréicoles sur les vagues en champ proche. Dans ces différentes approches, nous nous intéresserons donc aux effets d'une, deux voire trois tables à huîtres sur les vagues.

### II.1.1. Mesures in-situ

Depuis plusieurs années, comme en d'autres lieux de conchyliculture, les ostréiculteurs de la Baie du Mont Saint-Michel connaissent des difficultés dans l'exploitation de leurs concessions, dues à l'envasement des parcelles situées sur le haut de l'estran.

Afin de pérenniser ces exploitations et d'assurer une optimisation de la qualité des huîtres, la Section Régionale Conchylicole de Bretagne Nord a décidé une restructuration de grande ampleur du cadastre conchylicole, qui a eu lieu entre 2003 et 2005.

Elle a permis le déplacement d'une partie de l'activité ostréicole du sud de Cancale, où les conditions étaient devenues trop difficiles, vers un espace mytilicole situé au sud-ouest de la baie, entre Saint-Benoît des Ondes et le Vivier sur Mer, lui-même déplacé vers l'Est (figure II.1).

C'est sur ce nouvel ensemble ostréicole (environ 4 km<sup>2</sup>) que se focalisent nos mesures in-situ décrites et commentées dans les chapitres II et III.

Dans la suite de l'exposé, ce nouvel ensemble de structures sera dénommé « nouveau parc ostréicole ».

Nous avons choisi le site de la Baie du Mont Saint-Michel pour étudier l'impact des installations ostréicoles sur l'hydrodynamique (vagues et courants) pour plusieurs raisons :

- Les forçages hydrodynamiques, que ce soit les courants de marée ou les vagues, y sont remarquables : fortes intensités de courant liées à un marnage extrême, présence de houle générée dans l'Océan Atlantique et de vagues de vent générées au sein de la baie. Ces paramètres nous permettent d'étudier les effets des structures sur une large gamme de facteurs hydrodynamiques.
- La topographie est relativement « uniforme » : faible pente et estran plat qui permet de s'affranchir des effets hydrodynamiques locaux autres que ceux liés à la présence des installations.

- Le parc ostréicole, récemment installé et donc exempt de problème d'envasement, présente une configuration « simple » et structurée en termes de disposition des tables à huîtres.

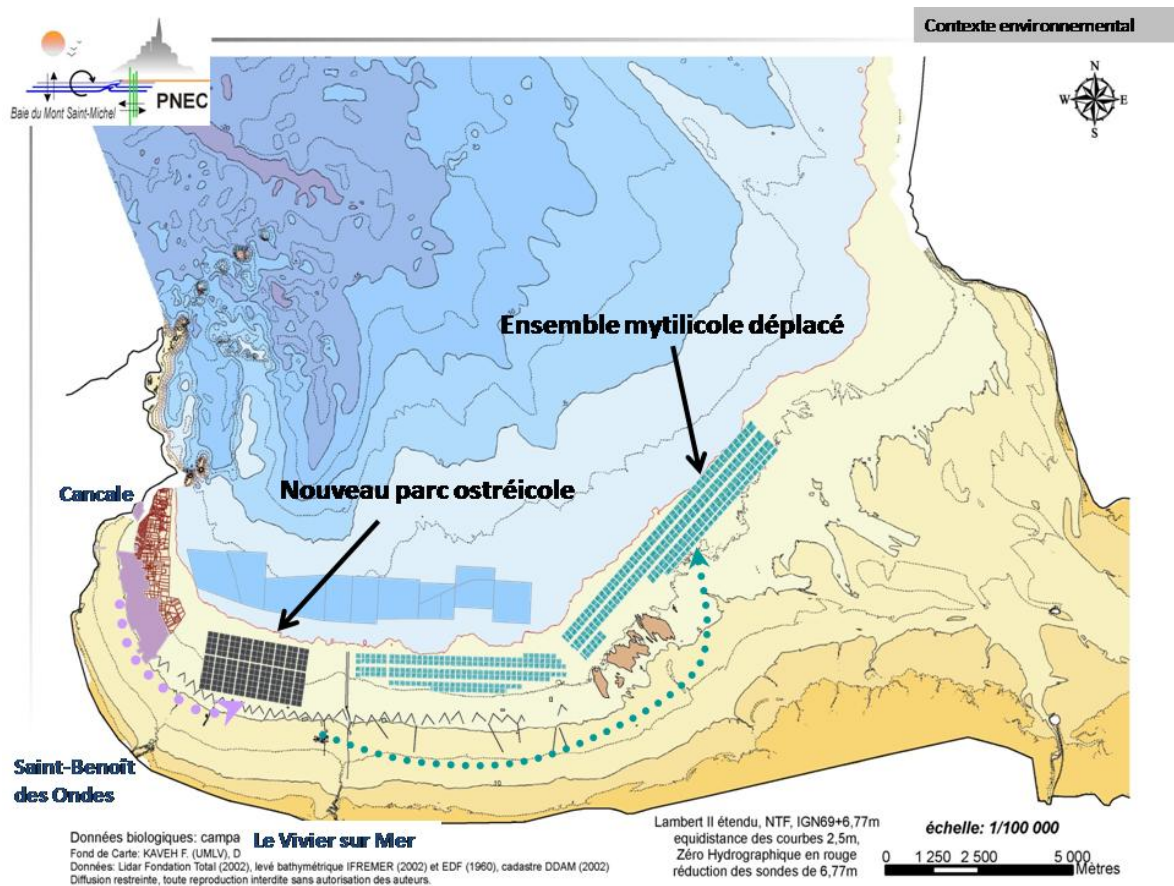


Figure II.1: Restructuration conchylicole dans la Baie du Mont Saint-Michel (PNEC Baie du Mont Saint-Michel)

Au niveau des faciès sédimentaires, la Baie du Mont Saint-Michel présente deux principaux gradients sable-vase : un gradient Nord/Sud et un gradient Est/Ouest. Au niveau de la zone du parc du Vivier sur Mer, il y a présence de sables moyens et de vases mobiles (figure II.2).

Les tables du parc ostréicole ont été alignées avec la direction des principaux courants de marée (figure II.4), qui est aussi la direction principale de propagation des vagues (figure II.3).

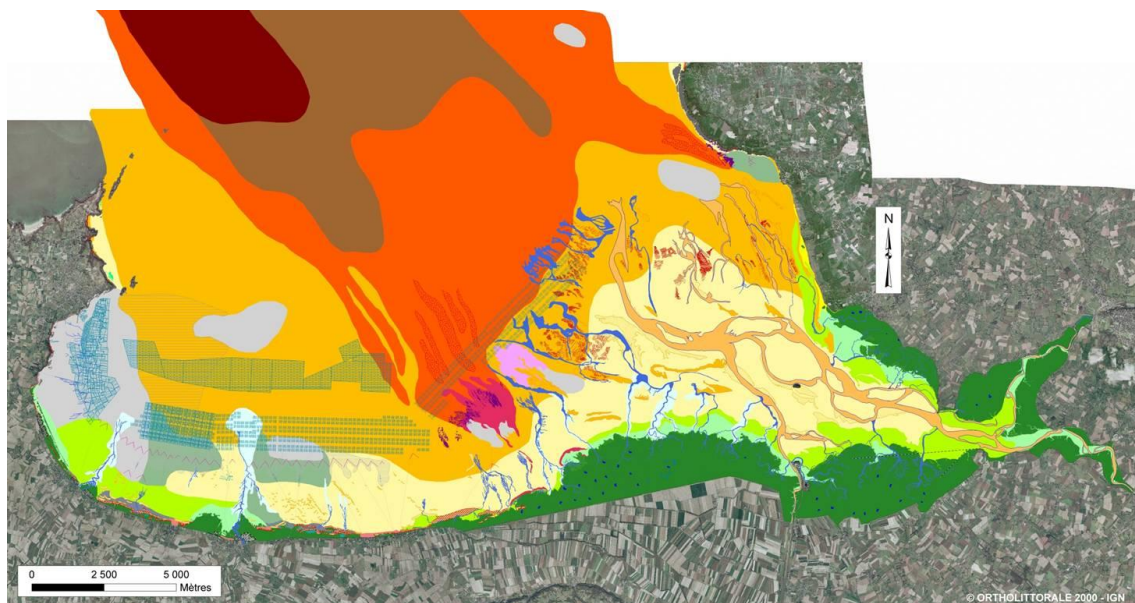


Figure II.2 : Faciès sédimentaires de le Baie du Mont Saint-Michel (d'après Bonnot-Courtois et al., 2007)

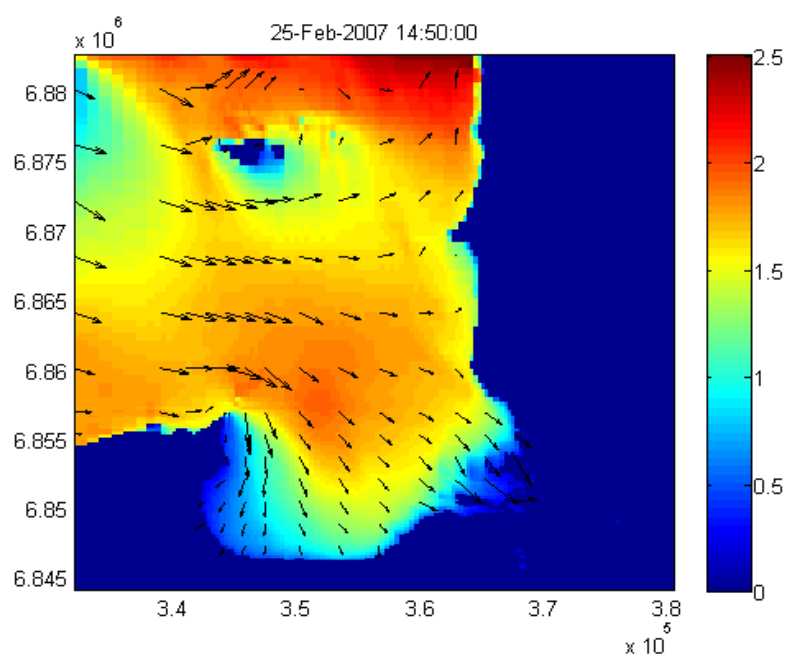
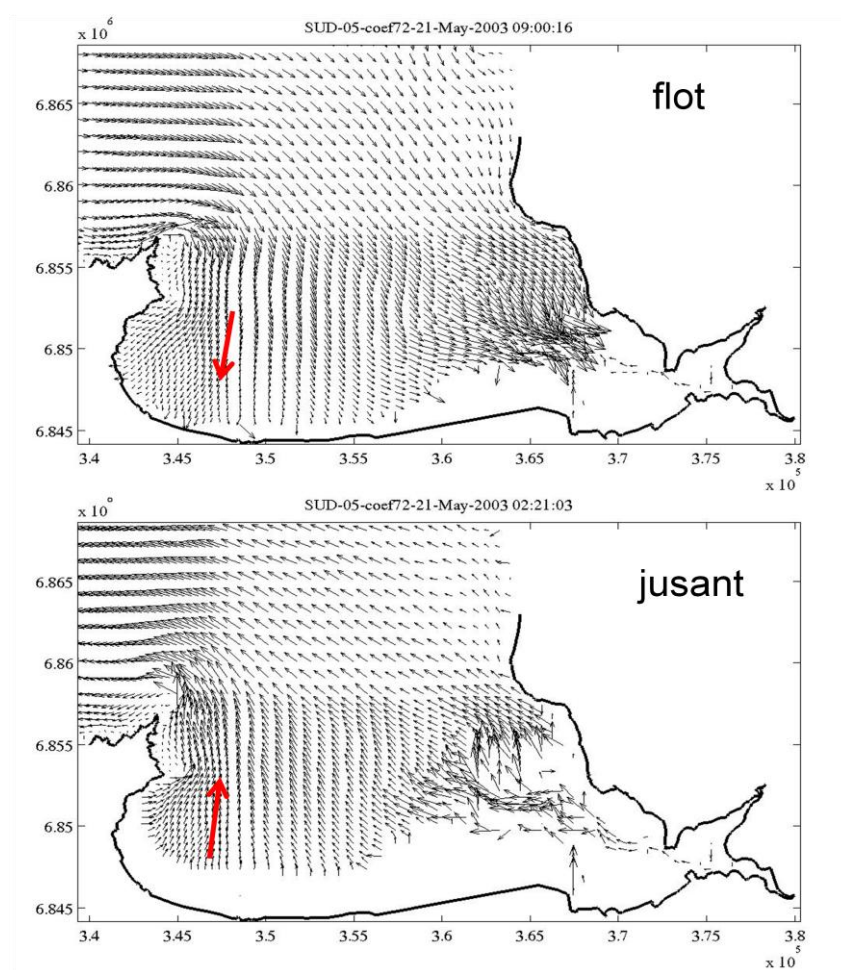


Figure II.3 : hauteurs significatives (m) et directions des vagues issues du modèle SWAN.



*Figure II.4 : directions principales des courants de marée lors du flot et du jusant dans la Baie du Mont Saint-Michel (d'après Cayocca et al., 2006).*

Afin d'évaluer les éventuelles modifications des caractéristiques de vagues dues à la présence d'une table à huîtres, nous avons installé 3 capteurs de pression (figure II.2) au centre du nouveau parc ostréicole durant l'hiver 2007. Rappelons que selon les observations de l'inventaire des zones conchylicoles (voir introduction), les envasements peuvent être localisés sous les tables ou dans les allées entre tables et qu'il convient donc d'installer des capteurs dans ces zones adjacentes afin de comprendre les différences hydrodynamiques qui peuvent exister.

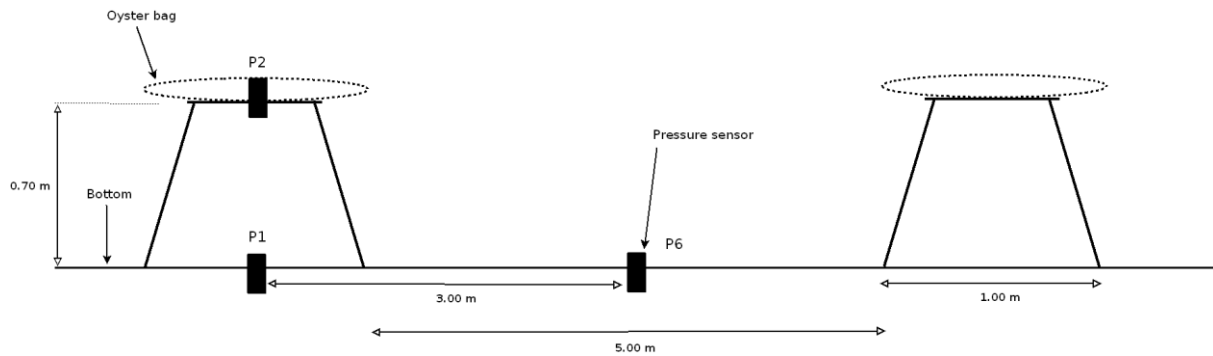


Figure II.5: schéma du positionnement des capteurs de pression ALTUS au centre du parc.

2 doublets de capteurs sont ainsi définis :

- le doublet P1/P2 : le capteur P1 est situé près du fond sous une table à huîtres et le capteur P2 est situé sur la même verticale à la hauteur de la table à huîtres (figure II.3 gauche). Le but de ce doublet est de détecter une éventuelle modification, due à la présence des poches à huîtres, de l'agitation liée aux vagues (différence de vitesses orbitales) sur une même verticale.
- Le doublet P1/P6 : les 2 capteurs sont situés près du fond à 3 m l'un de l'autre, le premier (P1) est situé sous la table et le second (P6) est situé au centre d'une allée (figure II.3 droite). Le but de ce doublet est d'évaluer une éventuelle modification des caractéristiques de vagues liée à la différence de « topographie » locale due à la présence ou non de table.

Les capteurs de pression utilisés sont des capteurs d'ALTUS (Jestin et al., 1998) qui ont été « upgradés » (augmentation de la taille de carte mémoire afin de permettre l'enregistrement des vagues).

L'article « Utilisation d'un altimètre (ALTUS) destiné à la quantification des dépôts/érosion en domaine littoral pour l'étude des corrélations avec les caractéristiques de vagues et les interfaces de dépôt » situé en annexe présente une description détaillée du système ALTUS upgradé. Notons que nous n'utilisons pas ici le transducteur acoustique du système.

Ces appareils ont été positionnés pour une durée de 1 mois, du 19 février au 20 mars 2007.





*Figure II.6: capteurs de pression ALTUS P1 et P2 à gauche, capteur de pression P6 à droite.*

Caractéristiques des appareils de mesure :

Fréquence de mesure	Longueur des bursts	Cadence des bursts	Gamme de mesure	Précision de la mesure	Asservissement à la pression
2 Hz	1042 mesures (soit 8mn40s)	15 mn	0-25 m	+/- 8 cm	oui

Par le biais de ces capteurs, nous obtenons des séries temporelles de pression d'une durée d'un mois. A partir de ces séries, nous pouvons remonter à la hauteur d'eau au dessus de chaque appareil, ainsi qu'aux caractéristiques des vagues de surface (Wiberg and Sherwood, 2008), nos mesures étant effectuées à suffisamment haute fréquence.

Néanmoins, avant d'effectuer ces calculs, il convient de prendre quelques précautions. En effet, en fonction de la profondeur d'immersion du capteur, l'atténuation de la pression dynamique rend parfois difficile la transformation de la pression mesurée en fluctuations de surface (Ancil and Quach, 1997). Plus la

hauteur d'eau est grande, plus le signal de pression dû aux vagues qui lui parvient est faible ; notamment si la vague est de faible longueur d'onde (la longueur de pénétration est de l'ordre de la demi-longueur d'onde).

Une correction de pression (<http://neumeier.perso.ch/index.html>) est donc appliquée à toutes les séries de mesures afin de tenir compte de ces différentes atténuations du signal.

Le premier doublet de capteurs (P1/P2) a été installé pour évaluer une éventuelle atténuation de pression sur la verticale, autre que l'atténuation de pression due à la profondeur d'immersion. La méthodologie est donc d'appliquer cette correction de pression aux deux capteurs du doublet, en ignorant la présence de la table à huîtres. Sans table, les deux signaux seraient identiques ; une différence entre ces deux signaux serait donc imputable à la présence de la table.

Les méthodes de calculs afin de remonter aux caractéristiques de vagues ainsi que les principaux résultats de la comparaison des mesures sont exposés dans l'article «The impact of oyster structures on hydrodynamics in a macro-tidal environment» (soumis), section *Near-field impact of structures on hydrodynamics*.

#### Résumé de l'article (partie impact local sur les vagues) :

Il n'y a pas de différence significative entre les enregistrements des capteurs P1, P2 et P6 que ce soit au niveau des périodes ou des hauteurs significatives de vagues. L'atténuation de la hauteur significative de vagues dépasse 20 % pour 13 % des vagues quand on regarde le doublet P1/P2 et pour seulement 1 % des vagues quand on regarde le doublet P1/P6.

En résumé, ces résultats suggèrent qu'il n'y a pas de modification locale des vagues par la présence d'une table à huîtres. Tout se passe donc comme si les vagues, qui sont des phénomènes possédant une longueur d'onde de la dizaine à la centaine de mètres, ne percevaient pas (sous cet angle d'incidence) la différence de topographie de l'ordre du mètre engendrée par la présence des obstacles (tables).

# The impact of oyster structures on hydrodynamics in a macro-tidal environment

Y. Kervella<sup>a,b\*</sup>, F. Cayocca<sup>a</sup>, R. Verney<sup>a</sup>, H. Jestin<sup>a</sup>, P. Bassoullet<sup>a</sup>, P. Cann<sup>a</sup>, P. Le Hir<sup>a</sup>, P. Lesueur<sup>b</sup>

<sup>a</sup> IFREMER, DYNECO/PHYSED, Centre de Brest, BP 70, 29280 Plouzané, France.

<sup>b</sup> Laboratoire M2C Université de Caen-Basse Normandie, CNRS/INSU UMR 6143, 2-4 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France

\*Corresponding author: [Youen.Kervella@ifremer.fr](mailto:Youen.Kervella@ifremer.fr)

---

## Abstract

In a macrotidal environment, sediment dynamics are controlled by tidal flows and waves. This paper deals with the impact of oyster farming structures on these hydrodynamic forcings, in Mont Saint-Michel Bay, France. The near-field impact (at the scale of one or two tables) of oyster structures on hydrodynamics, i.e. waves and currents, and the global impact (at the scale of the oyster farm) on waves were investigated. Pressure sensors and acoustic Doppler velocimeter measurements revealed that wave characteristics are identical under oyster tables and in the rows, which suggests that the presence of an individual/single oyster table does not induce a local wave modification; in contrast, intensities of tidal flows are locally modified (up to 50 % of difference between velocity below a table and velocity between rows of tables during the flood, and up to 40 % during the ebb) as well as direction (up to 15° of deviation during the flood and up to 20° of deviation during the ebb). Two cases can be distinguished when investigating the global impact of an oyster farm on waves: at high water, long waves are attenuated (attenuation of up to 40 %) but not short waves; in the shallow water case, both long waves and short waves are significantly attenuated (half of them are divided by 2 or more). Wave-induced bottom shear stresses are computed from the wave heights measurements. In the shallow water case, short wave-induced bottom shear stresses are nearly damped. Finally, the impact of an oyster farm on sediment dynamics has been discussed.

*Keywords: Oyster tables, in situ measurements, hydrodynamic forcing, tidal environment, wave attenuation.*

---

## 1. INTRODUCTION



Numerous bays or basins present very high sedimentation rates. This report can be explained by a mixing of natural processes such as tidal flow and wave propagation, and human-related processes such as oyster or mussel farming (figure 1). Bertin et al. (2005) suggest that the presence of oyster structures is one of the causes of morphological changes in the bay of Marennes-Oléron, France. More or less important silting up has been observed on tidal flats within oyster farming everywhere along the French coast. The same report is made in numerous bays all over the world, particularly in New-Zealand (Forrest et al., 2009).



*Figure 1: silting up in an oyster farming area*

France is the first oyster producer in Europe, with 130 000 tons of oysters harvested per year. The most widely used cultivation technique, “elevated farming”, which is the most adapted to coasts open to waves and currents since oysters are protected in plastic bags, consists of a set of rows of so-called tables.

An oyster table is a structure made of metallic wire on which porous plastic bags filled with oysters are laid. This 100 m x 1 m structure is installed over muddy or sandy tidal flats. An oyster farm, whose dimension can be several squared kilometres, consists of a set of rows of these tables generally separated by 5 m wide alleys (figure 2). These oyster tables create artificial obstacles. These obstacles are directly responsible for modifications of tidal flow and wave propagation. Since tidal flows and waves control sediment dynamics, oyster structures can have an impact on sedimentation rates and other processes like erosion or flocculation. This impact was first described by Sornin (1981). In this earlier work, currents were measured by a current meter ECKMAN-MERZ every hour close to the bottom and close to the free surface. Waves were simply investigated by means of observations. He concluded that oyster tables could induce a decrease in velocity and a deviation of the tidal flow, a local wave damping and flow canalization. But no accurate investigation of the hydrodynamics or sediment dynamics modifications related to these structures was made since.



*Figure 2: oyster farm in the Mont Saint-Michel Bay. Tables are 100 m long by 1 m wide. The width of an alley is 5 m.*

Since the early eighties, devices greatly improved with the emergence of high performance optic and acoustic sensors. These new devices allowed more accurate field measurements of waves, currents and turbidity. Whitehouse and Mitchener (1998) and Whitehouse et al. (2000) used several methods (current meters, pressure sensors, SPM sensors, ARX bed elevation transducer,...) to respectively assess the linkage between hydrodynamic forcing and the morphodynamic response of the bed and the linkage between bed forms and sediment transport. Christies et al. (1999) recorded current velocity (electromagnetic current meter), suspended sediment concentration (OBS + *in-situ* calibration) and bed elevation (ARX II acoustic scour monitor) over 12 months to identify the physical processes responsible for the sediment transport across a macrotidal mudflat. Bassoullet et al. (2000) investigated sediment dynamics on an intertidal mudflat by continuous measurements of turbidity (optical backscatter sensors OBS), waves (pressure sensor) and tidal currents (electromagnetic current meter) and bed level monitoring (ALTUS altimeter). Deloffre et al. (2007) estimated sedimentation rhythms on intertidal mudflats by means of acoustic Doppler velocimeter ADV and altimeter ALTUS measurements, combined with sediment analysis. Bed shear stresses (wave-induced, current-induced and wave-current interaction induced) values at the mouth of the Seine estuary were estimated by Verney et al. (2007) with an ADV and an ALTUS too. Tessier et al. (2008) obtained turbidity information from the backscatter intensity of a current profiler ADCP. Plew (2005) used several current profilers ADCP to measure the velocity attenuation within long-line mussel farms in New-Zealand. Nevertheless, no deployment has focussed on the impact of oyster farming on hydrodynamics.

Concurrently, numerical studies were carried out in order to estimate the morpho-sedimentary effects of oyster or mussel posts (SeaMER, 2000, SOGREAH, 1986). Cayocca et al. (2008) introduced the effects of mussel farms on flow circulation and sediment dynamics in a numerical model by increasing the hydraulic roughness used for velocity computations at the location of mussel structures.

From an experimental point of view, the impact of oyster tables on the wave pattern and on the bottom shear stress was estimated by Guizien (1996) with a few restrictions: tables were simply modelled by horizontal solid plates, for normal incidence only and without currents.

Kervella et al. (2009a) highlight an asymmetric development of the boundary layers and an important decrease in flow velocity around a single oyster table which suggests the existence of preferential areas for silting up and suspended matter fragmentation under the table. To our knowledge, no other experimental study has been carried out on the interaction between oyster tables and their hydrodynamic and sedimentological environment.

The present study aims at estimating the effect of oyster farming structures on hydrodynamics in a macrotidal environment: wave attenuation, tidal flow modifications and bottom shear stresses modifications. The first part of the results section consists in estimating the near-field impact of structures on hydrodynamics, i.e. how a single oyster table can modify wave heights and tidal flow. The second part highlights the global impact of structures on waves, i.e. how an oyster farm can modify wave propagation. We defined the “near-field impact” as the impact of one oyster table (measurements under a table and in an alley between two rows of tables), and the “global impact” as the impact of the whole oyster farm. The last part of the paper deals with the impact on sediment dynamics via superficial sediment characteristics analysis.

## 2. STUDY AREA, STRATEGY AND DATA PROCESSING

### 2.1. Field site

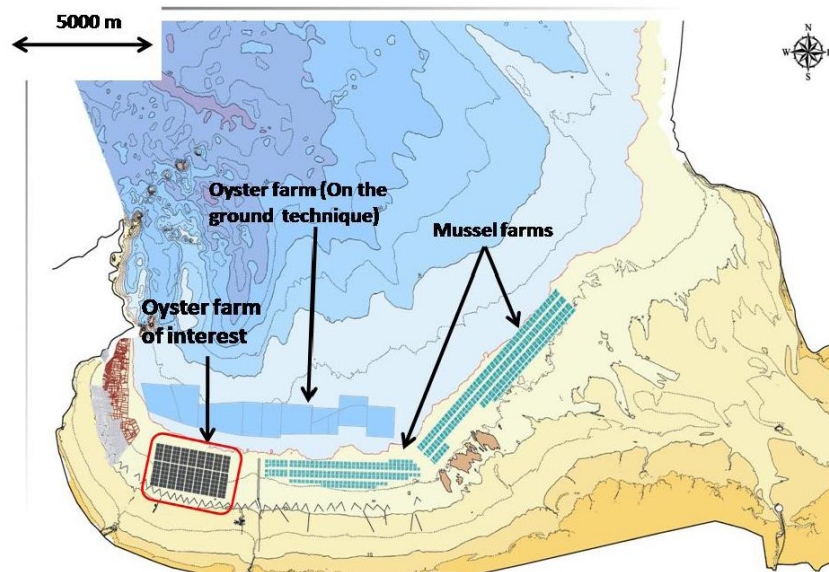


Figure 3: Map of Mont Saint-Michel Bay

Mont Saint-Michel Bay lies in the Breton-Normand gulf (English Channel); it is one of the most important areas of oyster production in France, with more than 4500 tons of oysters harvested per year.

The Bay is a well-known macrotidal environment with more than 14 m maximal tidal range and strong tidal currents. It is also exposed to swell generated in the Atlantic Ocean. The present study focuses on a new 4 km<sup>2</sup> oyster farm (installed from 2003 to 2005) located in the south-western part of the bay (figure 3).

The farm consists of a set of 100 m x 100 m blocs. There are respectively 17 and 10 blocks in the long-shore and cross-shore directions. The distance between two blocks is 25 m.

Each block is composed of 16 rows of tables (100 m long by 1 m wide). The distance between two rows, i.e. the width of an alley, is 5 m (figure 2).

## 2.2. Strategy

The fieldwork strategy is to evaluate the impact of oyster structures on hydrodynamics at two different spatial scales. It is based on the deployment, during winter 2007, of a set of 10 ALTUS pressure sensors (Jestin et al., 1998) and 2 Acoustic Doppler Velocimeters (ADV):

- Wave propagation in the cross-shore direction with and without the influence of the oyster farm is investigated: 2 pressure sensors are positioned at the west of the farm and 3 sensors are positioned at the east of the farm, each at 30 m away from the farm (figure 3), in order to investigate wave propagation outside the oyster farm. Since the topography is quite smooth in this part of Mont Saint-Michel Bay, we consider that the results are representative of wave propagation without the influence of the farm. 3 pressure sensors are positioned through the farm (figure 3) in order to evaluate wave propagation in the cross-shore direction with the influence of the oyster farm. The long-shore variability of wave attenuation is also estimated upstream and downstream the farm towards wave propagation (i.e. respectively north and south of the farm).

- On the other hand, the local fluid-structure interactions are investigated. The aim is to evaluate processus differences (induced by wave propagation) below a table, above a table and next to a table. In the case of the estimate of processus differences on the vertical (above and below a table), if there is no table, no difference exists on the vertical, while if there is an impermeable plate, the differences are weaker but still exist (Guizien, 1996). Since the permeability of oyster bags has never been investigated, we try to quantify the effects of the presence of an oyster table on the processus locally induced by waves.

For this purpose, 3 pressure sensors and 2 ADV (figure) are positioned in the middle part of the oyster farm, above a table, below a table and in an alley between two rows of tables.

The ADV provides 3D current velocity at 4Hz (after signal calibration, Verney, 2007) 5 cm above the bed during 4 minutes every 10 minutes, and allows wave and related shear stresses calculations (wave-current interaction). The ALTUS pressure sensors record the water level during 9 minutes every 15 minutes at 2Hz.

## 2.3. Data post processing

### 2.3.1. Pressure sensors measurements

Except for the pressure sensor P2, the pressure is measured about 10 cm above the bottom.

A pressure correction is first applied to correct sea-surface time-series for pressure attenuation with depth (from the linear wave theory). Several wave parameters are then computed according to Wiberg and Sherwood (2008):

The significant wave height  $H_{sig}$ :

$$H_{sig} = 4\sqrt{m_0} = 4\sqrt{\int S_p(f)df} \cong 4\sqrt{\sum S_p(f_i)\Delta f_i}$$

where  $S_p$  is the pressure spectral density,  $f$  the wave frequency and  $m_0$  is the variance of the water surface elevation once corrected from depth attenuation.

The orbital velocity spectrum at the bottom boundary can be calculated from the pressure spectrum (Wiberg and Sherwood, 2008):

$$S_{uv}(f_i) = \frac{\omega_i^2}{\sinh^2(k_i h)} S_p(f_i)$$

where  $\omega$  is the angular frequency,  $k$  the wave number,  $h$  the water depth and  $S_{uv}$  is the spectral densities of the horizontal velocity components.

A representative bottom orbital velocity is then deduced:

$$U_{br} = \sqrt{2} \left( \sum_i \left[ \frac{4\pi^2}{T_i^2 \sinh^2(k_i h)} S_{uv}(f_i) \Delta f_i \right] \right)^{\frac{1}{2}}$$

The representative wave period at the bottom  $T_r$  is defined by Madsen (1994):

$$T_r = \frac{1}{f_r} = \frac{\sum S_{uv}(f_i) \Delta f_i}{\sum f_i S_{uv}(f_i) \Delta f_i}$$

Wave shear stress is calculated from wave orbital velocities and wave period, assuming a bed roughness length  $z_0$ . Estimating roughness length is still a debate and no consensus exists. Soulsby (1997) made roughness measurements in current flumes with different natural sediments. He found some values for  $z_0$  that can be used to estimate the total shear stress (from 0.2 mm for mud to 6 mm for rippled sand). However, this certainly overestimates the skin shear stress, which controls sediment erosion. In our case, we assume the bed remains flat and assume a constant value of 0.2 mm.

So, the wave shear stress  $\tau_w$  is given by:

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w U_{br}^2$$

where  $f_w$  is the wave friction factor, which depends on the turbulent characteristics of the flow. In our case, the flow is turbulent, and the friction factor is obtained from the relation (Soulsby, 1997):

$$f_w = 1.39 \left( \frac{U_{br} T_r}{2\pi z_0} \right)^{-0.52}$$

Moreover, when a bi-modal wave spectrum is observed, we investigate separately long and short waves in order to estimate their relative contributions. Separation is made by a cut-off frequency (7s in our case).

### 2.3.2. ADV measurements

ADV measurements give access to the three directional components of the current velocity. Velocity measurements are recorded in the East/North/Up coordinates, automatically compensating for any movement of the instrument using data provided by the ADV internal compass. This minimizes errors due to the potential ADV misalignment with the vertical.

Mean current velocity and bottom shear stress are obtained by averaging instantaneous and fluctuating components of the flow over the burst duration (260 s).

Wave-current shear is calculated using the Turbulent Kinetic Energy (TKE) method as described by Soulsby and Humphrey (1990). This method is based on the separation of the wave-induced ( $u'_w, v'_w, w'_w$ ) and turbulence-induced ( $u'_t, v'_t, w'_t$ ) variances of each fluctuating velocity components  $u'$ ,  $v'$  and  $w'$  through a spectral analysis. During wave events, the energy spectrum consists of the superposition of the conventional turbulent spectrum featured by the Kolmogorov -5/3 roll off in the inertial subrange and a typical wave spectrum, identified as a peak of energy in the wave frequency range (typically between 1 and 0.1Hz for wind waves). According to Soulsby and Humphrey (1990), the energy spectrum is split in two parts at the base of the wave peak. This method is performed automatically on the full  $u$ ,  $v$  and  $w$  dataset where, according to the Kolmogorov theory, the separation line corresponds to an interpolation of the -5/3 slope (in log space), with a reference point at  $f = 3\text{Hz}$  (outside the wave frequency range). The area below the interpolation line therefore corresponds to the turbulent kinetic energy of the velocity component considered (respectively  $u'^2$ ,  $v'^2$  or  $w'^2$ ), and the area above the line to the wave variance contained in the fluctuating part of the velocity component. This TKE method was successfully applied to intertidal environment (Verney et al., 2007).

The TKE shear stress ( $\tau_{\text{TKE}}$ ) is determined from the turbulent kinetic energy  $K$ :

$$\tau_{\text{TKE}} = \rho C_{\text{TKE}} K = 0.5 \rho C_{\text{TKE}} \left( \overline{u_t'^2} + \overline{v_t'^2} + \overline{w_t'^2} \right)$$

Various  $C_{TKE}$  values are proposed in the literature for different estuaries, ranging from 0.18 to 0.21 (Soulsby, 1983; Kim et al., 2000; Talke and Stacey, 2003). In the present study, the most widely used value of 0.19 is chosen.

Similarly to the ALTUS post-processing, the significant wave height ( $H_s$ ) and significant wave period ( $T_s$ ) are calculated from the water level ( $h$ ) time series over each burst.

Since the ADV directly measures velocities close to the bed, the wave shear stress  $\tau_w$  is given by:

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w U_w^2$$

where  $U_w$  is calculated from the wave variance ( $u_w'$  and  $v_w'$ ) deduced from the turbulent spectrum analysis (Myrhaug et al., 1998):

$$U_w = 2\sqrt{u_w'^2 + v_w'^2}$$

In the present study, non-linear wave-current interaction is taken into account in the  $\tau_{TKE}$  calculations (Williams et al., 1998), and therefore the total wave-current bed shear stress  $\tau_w$  is given by:

$$\tau_{WC} = \sqrt{\tau_{TKE}^2 + \tau_w^2 \cos^2 \psi + \tau_w^2 \sin^2 \psi}$$

where  $\psi$  is the angle between the waves and the current directions (Soulsby, 1995).

Sediment erosion and re-suspension processes are directly linked to bottom shear stresses. These processes occur as soon as the bottom shear stress exceeds a critical value, which depends on superficial sediment characteristics.

### 3. RESULTS

#### 3.1. Near-field impact of structures on hydrodynamics

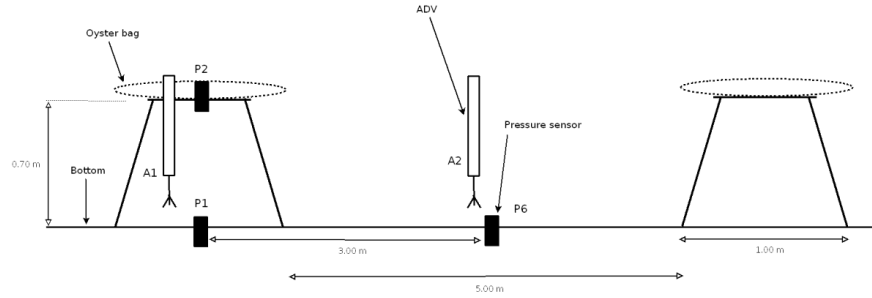
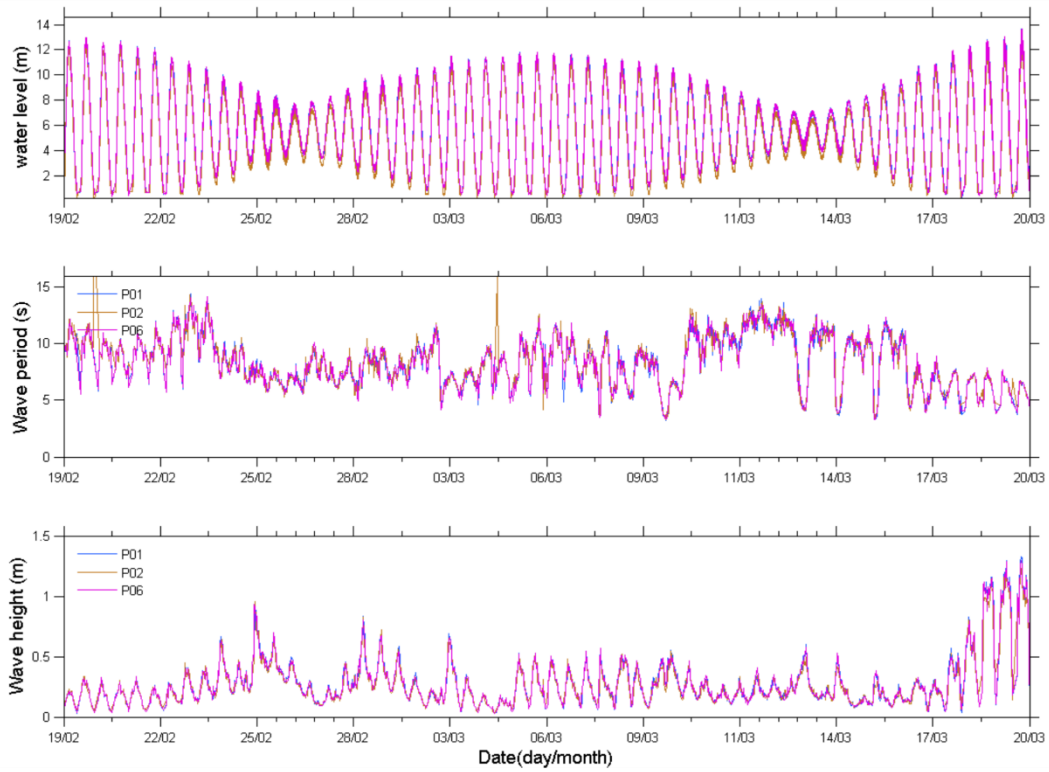


Figure 4: Sketch (side view) of an oyster table located in the middle of the farm (point P6) with the measurement devices.



Figure 4 shows the devices deployed in the middle of the oyster farm for this purpose: 3 ALTUS pressure sensors (under a table, above this table and between two rows, respectively P1, P2 and P6) and 2 ADV velocimeters (under a table and between two rows, respectively A1 and A2).

### 3.1.1. Waves



*Figure 5: Water level, wave periods and significant wave heights in the middle of the oyster farm, pressure sensors P1, P2 and P6.*

Tidal amplitude varies from 4 meters during neap tides to almost 14 meters during spring tides (figure 5). Wave periods range from 3 s to 15 s, corresponding to locally generated waves (wind waves) and long waves likely to have been generated in the Atlantic Ocean respectively. The same ranges were observed by Cayocca et al. (2008). Significant wave heights range from 0.10 m (arbitrary cut-off height) to 1.60 m at the end of the data (18-20 March 2007). The higher waves occurring after March 18 (wave periods about 5 s and significant wave heights higher than 1 m) correspond to a period of East and East/North-East winds about 9-10 m/s according to METEO-FRANCE model ALADIN (figure 6).



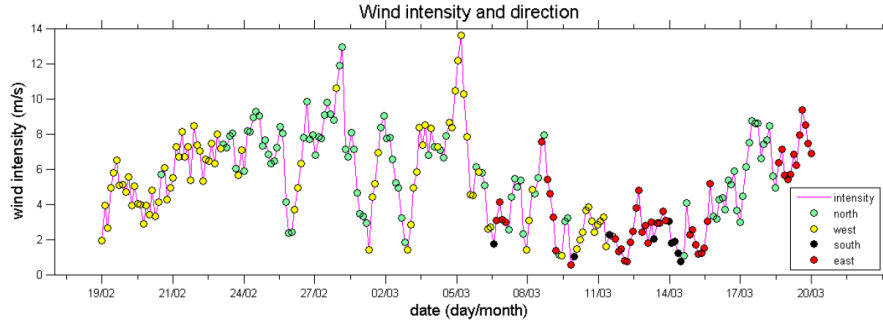


Figure 6: Wind intensity and direction in the south-western part of Mont Saint-Michel Bay during winter 2007 according to model ALADIN.

Pressure records from P1, P2 and P6 do not exhibit any significant difference (figure 5), which suggests that there is no local modification of wave due to the oyster table. Figure 7 shows the distribution of the wave heights attenuation for both P1/P2 and P1/P6 pairs. Attenuation A is calculated as according to:

$$A = \frac{H_f - H_i}{H_i} * 100 \quad (1)$$

where  $H_i$  is the significant wave height measured by the pressure sensor P1 and  $H_f$  the significant wave height measured by the pressure sensor P2 or P6.

The attenuation is less than 10 % for most waves and for both pairs (90 % of the waves for P1/P6, 74 % of the waves for P1/P2). The attenuation exceeds 20 % for only 13 % (P1/P2) and 1 % (P1/P6) of the waves.

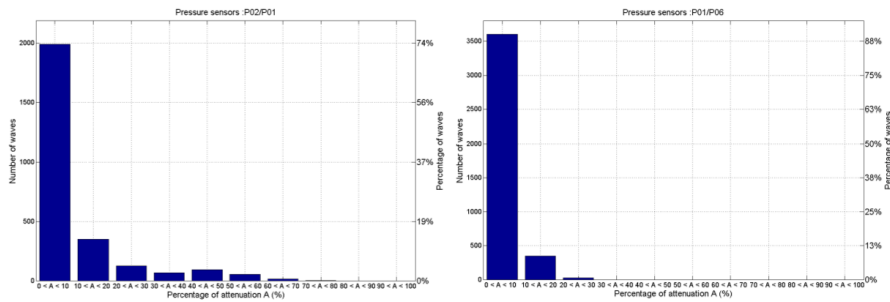


Figure 7: Percentage of wave heights (A) attenuation in the middle of the oyster farm, pressure sensors P1 and P2 (left), pressure sensors P1 and P6 (right).

### 3.1.2. Currents

The acoustic Doppler velocimeters (ADV) were deployed during two weeks (19 February- 5 March 2007). They were installed under and near an oyster table (see figure 4), so that the sampling volume was 5 cm above the bed for both.

Figure 8 shows the horizontal velocity for A1 (below a table) and A2 (between tables) during a spring tide. Velocities are therefore higher under the tables during the flood (up to 50 % higher) and inversely, higher between the tables during the ebb (up to 40 % higher). Moreover, tidal flows are locally modified in terms of direction. Velocities are shifted westward: up to 15° during the flood and up to 20° during the ebb.

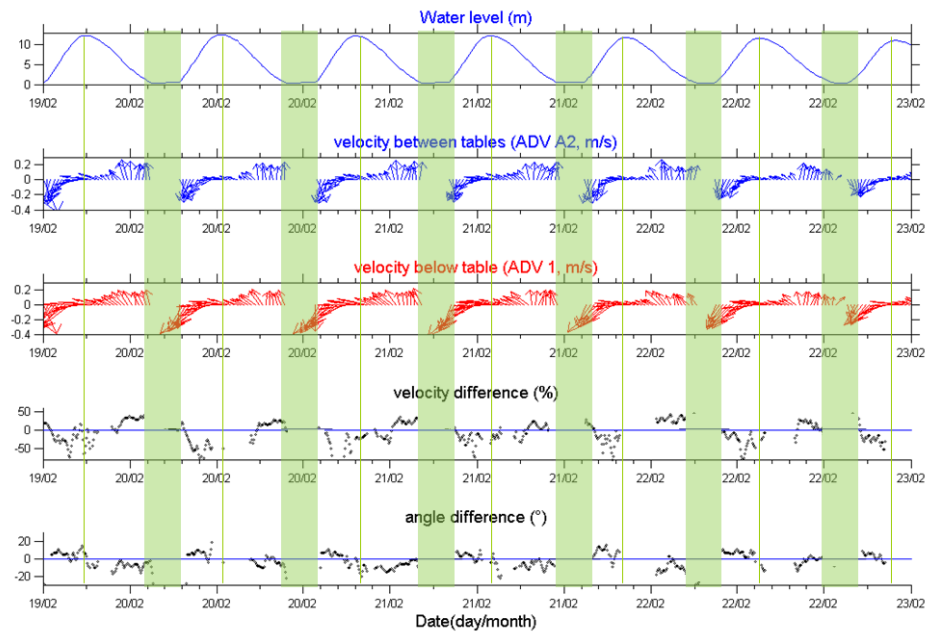


Figure 8: Water level, velocity vectors between (ADV A2 in blue) and below (ADV A1 in red) the oyster tables, velocity difference and angle difference.

### 3.1.3. Bottom shear stresses

Bottom shear stress is evaluated here by the mean of high frequency ADV measurements of the local hydrodynamics (see section 2.3.2). Figure 9 shows wave-induced and TKE (wave-filtered) bottom shear stresses in  $N.m^{-2}$  for ADV1 and ADV2 during the two weeks of the record.

During spring tides, when the velocity intensities are the strongest (up to  $0.35 \text{ m.s}^{-1}$ ) and with significant wave heights lower than 0.5 m, the maximum TKE shear stress is  $0.5 \text{ N.m}^{-2}$ . At the same time, the maximum wave shear stress is  $1.0 \text{ N.m}^{-2}$ . During neap tides, when the velocity intensities are lower (up to  $0.10 \text{ m.s}^{-1}$ ) and with wave events of more than 1 m in height, the maximum TKE shear stress is  $0.3 \text{ N.m}^{-2}$  and the maximum wave shear stress is  $2.5 \text{ N.m}^{-2}$ . There is no significant difference between the ADVs below the table and in the alley.

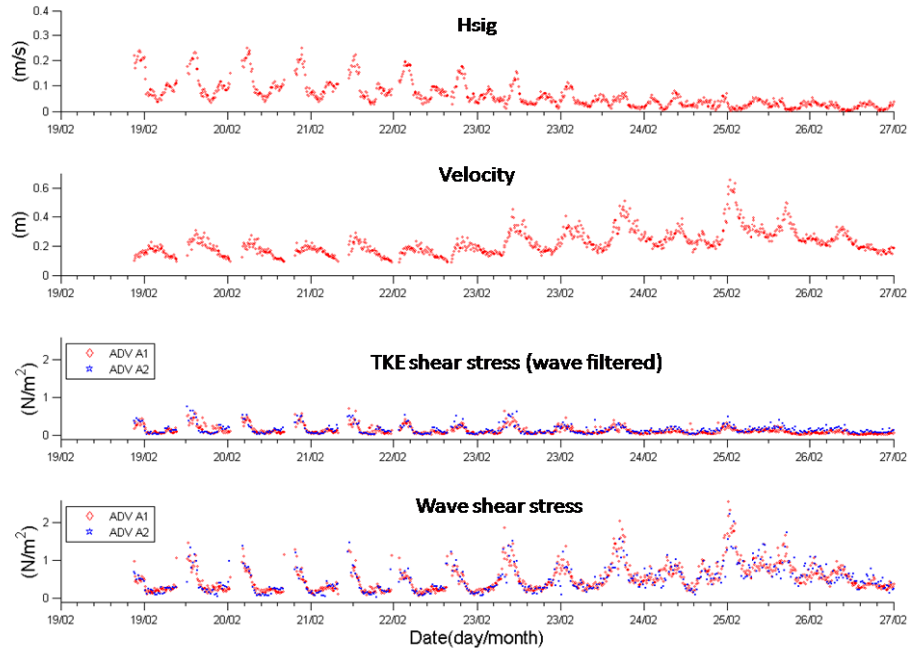


Figure 9: Velocity intensities, significant wave heights, TKE shear stress (wave filtered) and wave shear stress for ADV A1 and ADV A2.

### 3.2. Global impact of structures on waves

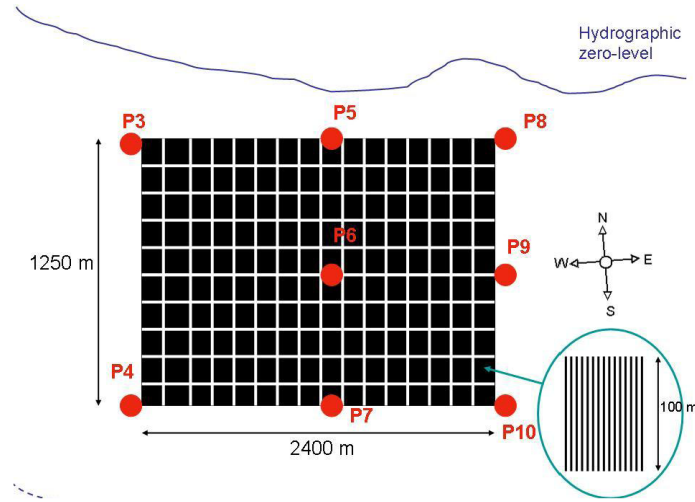


Figure 10: Sketch of the set of ALTUS pressure sensors located in and around the oyster farm

Unfortunately, pressure was not properly recorded by sensor P5 and wave characteristics are not available at this point. In order to compute an estimation of wave characteristics at this point, we used P3 and P8 data and assumed a linear longshore variability of the wave field. This assumption is supported by wave computations that were carried out on this site (Cayocca et al., 2007) and can be explained by the smooth bathymetric gradients on the tidal flat.

In this section, we distinguish two kinds of wave attenuation estimates: a long-shore estimate, parallel to the coastline, and a cross-shore estimate, perpendicular to the coastline, i.e. in the direction of wave propagation. Note that the main wave direction is perpendicular to the coastline, i.e. almost parallel to the direction of tables' alignment.

### 3.2.1. Long-shore estimate

Figure 11 shows the comparison of pressure sensors data P3 and P8, located in the lower tidal flat (i.e. northward), upstream the oyster farm with regard to wave propagation. Water level, wave periods and significant wave heights are shown.

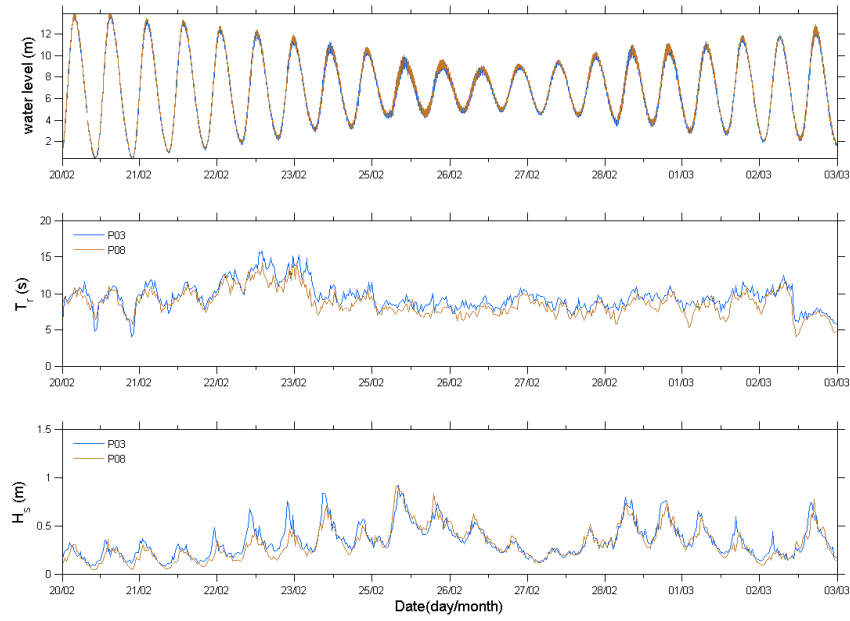


Figure 11: Water level, wave periods and significant wave heights upstream the oyster farm, pressure sensors P3 and P8.

We note that generally significant wave heights are a little higher in the western part of the bay (sensor P3) than in the eastern one (sensor P8). A wave frequency separation shows that these differences are mainly significant for long waves (maybe due to refraction on the left foreland of the bay).

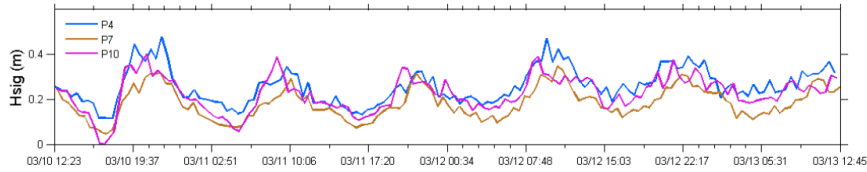


Figure 12: Significant wave heights downstream the oyster farm, pressure sensors P4, P7 and P10.

The comparison between the sensors P4, P7 and P10 (figure 12) reveals that the significant wave heights are lower in P10 (to the east of the farm) than in P4 (to the west of the farm), which was to be expected from looking at P3 and P8 measurements.

Significant wave heights are even lower in P7, located downstream (southward) the farm while the main direction of wave propagation is aligned with the direction of oyster tables.

This wave height difference is important, particularly at low water levels when attenuation can reach 30 % to 50 % as highlighted in figure 12. That is to say significant wave heights

may be divided by two, downstream the oyster farm during some particular conditions of water level and wave periods (shallow water case and short-waves).

A separation between short and long waves is made in order to understand the effect of the wave period on this attenuation (see figure 14).

Let us introduce a dimensionless parameter  $\beta$  which is the ratio between the oyster table height  $h$  and the water level  $d$  (figure 13):

$$\beta = \frac{h}{d}$$

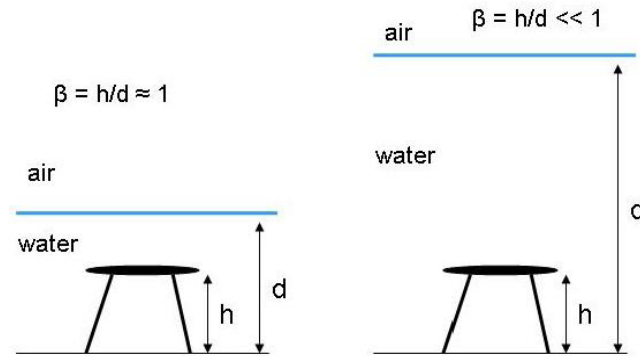


Figure 13: Sketch of the shallow water case (on the left) and the high water level case (on the right).

When  $\beta$  is much smaller than 1, i.e. in a high water level case, long waves are a bit attenuated downstream the oyster farm (from 10 % to 40 %) and short waves are not attenuated.

When  $\beta$  is  $O(1)$ , i.e. in a shallow water case, long waves are attenuated by the structures (from 20 % to 60 %) and short waves are strongly attenuated (from 40 % to 80 %). Short wave-induced bottom shear stresses nearly vanish downstream the farm.

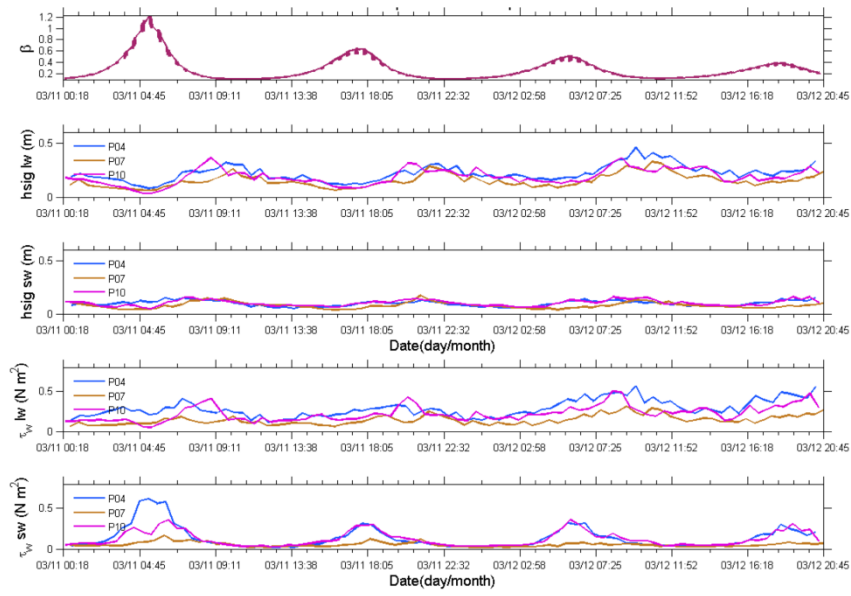


Figure 14: Significant long wave heights, significant short wave heights, bottom long wave shear stresses and bottom short wave shear stresses, downstream the oyster farm, pressure sensors P4, P7 and P10.

### 3.2.2. Cross-shore estimate

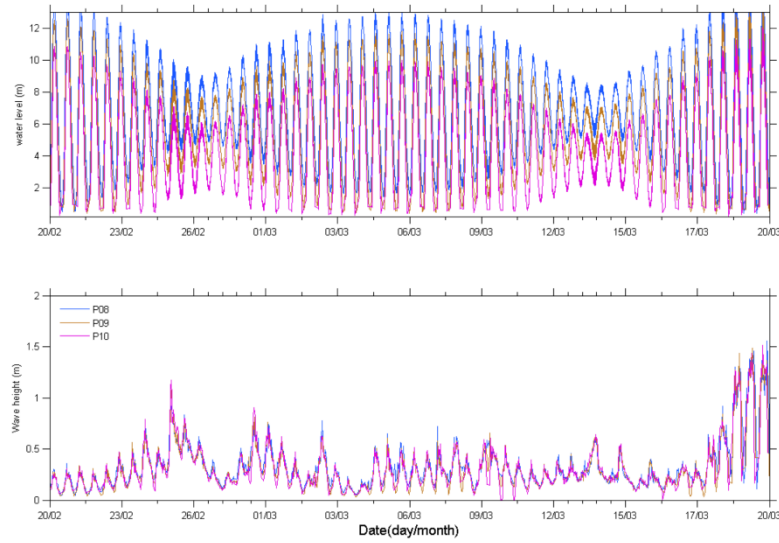


Figure 15: Water level and significant wave heights outside the oyster farm (East of the farm), pressure sensors P8, P9 and P10.

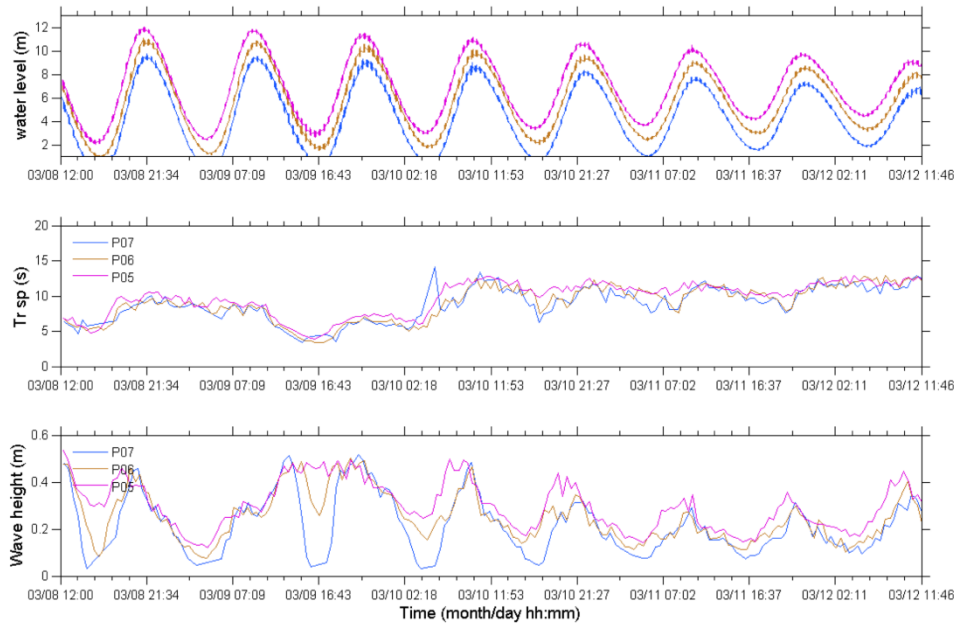
Three estimates of cross-shore wave attenuation are computed: one through the farm and one at each side (at the east and at the west of the farm). For the last two estimates, pressure sensors are located 30 meters away from the farm.

Cross-shore estimates outside the farm are calculated from P8, P9 and P10 sensors (east of the farm) and by P3 and P4 sensors (west of the farm).

Pressure records from P8, P9 and P10 on one hand (figure 15) and from P3 and P4 (not shown) on the other hand do not exhibit any significant difference, which suggests that there is no cross-shore wave attenuation outside the farm.

Cross-shore estimate through the farm is investigated from P5, P6 and P7 sensors.

This comparison between the sensors P5, P6 and P7 reveals that the significant wave heights are lower in P6 (middle of the farm) than in P5 (upstream the farm) and lowest in P7, located downstream the farm (figure 16). The attenuation is significant when  $\beta$  is 0 (1).



*Figure 16: Water level, wave periods and significant wave heights through the oyster farm, pressure sensors P5, P6 and P7.*

A wave frequency separation is made to see the effect of wave periods on this attenuation (figure 17). Long waves and short waves are strongly damped during spring tides and when  $\beta$  is 0 (1). During neap tides (on the right part of figure 15),  $\beta$  is always much smaller than 1 (from 0.06 to 0.2), there is no short waves attenuation and long waves are slightly damped.



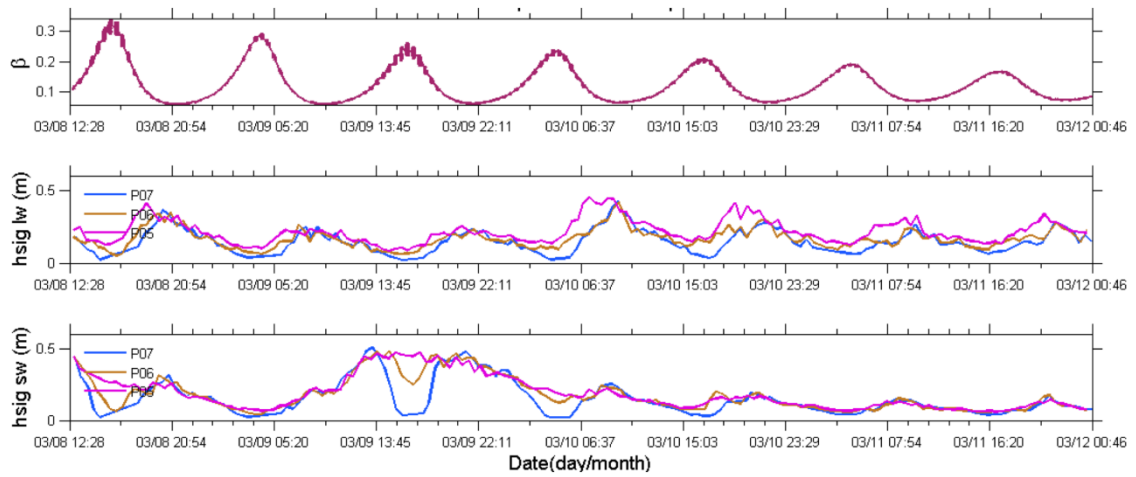


Figure 17: Significant long wave heights and significant short wave heights through the oyster farm, pressure sensors P5, P6 and P7.

Figure 18 shows the distribution of the wave heights attenuation between sensors P5 and P7. Attenuation  $A$  is calculated as according to (1).

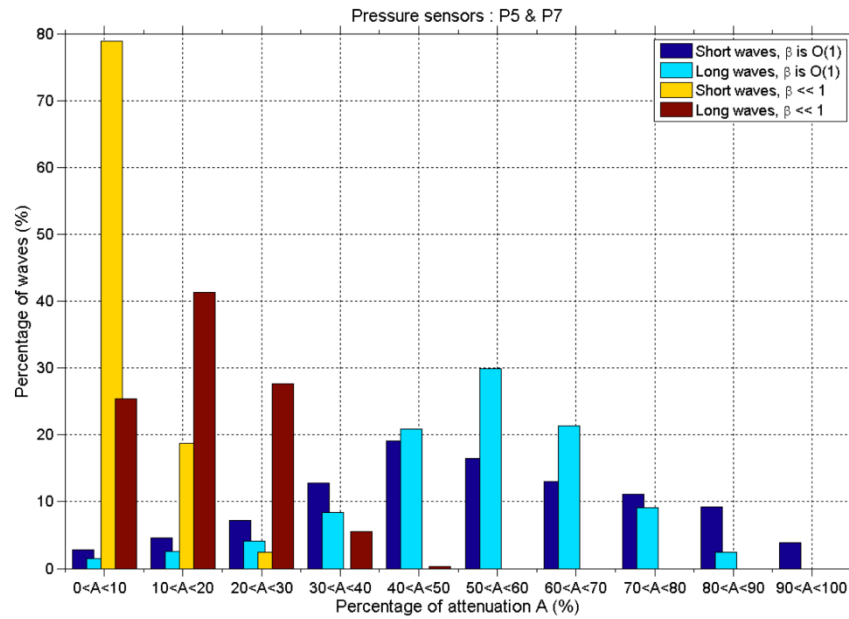


Figure 18: Percentage of wave heights attenuation ( $A$ ) between pressure sensors P5 and P7.

Long- and short-waves are distinguished during the analysis of the attenuation. Shallow water ( $\beta$  is 0 (1)) and deep water ( $\beta$  is lower than 1) cases are distinguished too. In deep water, 79 % of the short-waves are damped by less than 10 %. Short waves are not significantly damped

when the water level is large compared to the table height. But in this case, 75 % of long-waves exhibit 20 % attenuation or more. In the shallow-water case, 98 % of long-waves are significantly attenuated: 62 % of these long-waves are attenuated by over 50 %. The result is similar for short-waves: 97 % of these waves are significantly attenuated (more than 10 %) and more than half of them are divided by 2 or more.

Moreover, in the shallow-water case, short-wave induced bottom shear stresses are damped and long-wave induced ones are strongly attenuated.

## **4. DISCUSSION**

### **4.1. Impact on hydrodynamics**

Measurements reveal that local wave attenuation by an oyster table can be considered as insignificant: there is a small attenuation - but not really significant - of waves on the vertical by the oyster table, and there is no wave modification between a row and an alley (figure 5, figure 7). This result suggests that waves of several tens to hundreds of meters wavelength are not locally modified at the scale of the rows and alleys (1 to 5 m).

However, tidal flows are locally modified, in terms of intensity and directions, by the presence of the tables: up to 50 % of intensity modification and up to 20° of angle modification (figure 8). Kervella et al. (2009b) experimentally underlined the near-field impact of an oyster table on the flow and observed some reorientations under the table, from the bottom to the table level.

In terms of bottom shear stresses, there is no significant difference between the intensities below and between tables, since waves are the main forcing parameter in our study area and the same waves are measured in both locations.

Since bottom shear stresses are not modified, sediment re-suspension is not directly affected. But since tidal flows are modified, near-field sediment transport can be affected and preferential areas of silting up can be created.

The global impact of an oyster farm on waves has been investigated in the second part of this study. At the sight of the conclusions of the previous section as for the insignificant local wave attenuation, this global estimate is very important, more particularly for a future modelling of the oyster structures.

According to the long-shore (figure 12, figure 13) and the cross-shore (figure 16, figure 17) estimates, the wave attenuation by an oyster farm is significant, particularly when the water level is low (figure 18). Bottom shear stresses (BSS) are also modified: long-wave induced BSS are strongly attenuated and short-wave induced BSS are nearly damped in the shallow water case.

That is why the scale of the whole oyster farm seems to be the best one in order to take into account the impact of the oyster farming structures on waves in coastal hydrodynamics models.

### **4.2. First step on the impact of oyster structures on sediment dynamics**

This section represents a first approach in the comprehension of oyster structures effects on sediments and must be carefully considered. Verification through field records or modeling are needed.

Several cores of superficial sediment (close to P6 and P7 and at the east of the farm) were sampled during spring low tides on our study site. The measured parameters were: water content in the sediment, dry density and grain-size distribution (laser granulometer).

	Water content	Dry density	D50	Mud fraction
Sediment in P7	97 %	755 g/L	80 $\mu\text{m}$	48 %

Table 1: *Sediment characteristics close to the pressure sensor P7.  
The mud fraction is the fraction of sediments whose size is smaller than 63  $\mu\text{m}$ .*

Since significant attenuation of wave-induced bottom shear stress was observed in P7 (figure 12), we focussed on the sediment characteristics at this location (table 1).

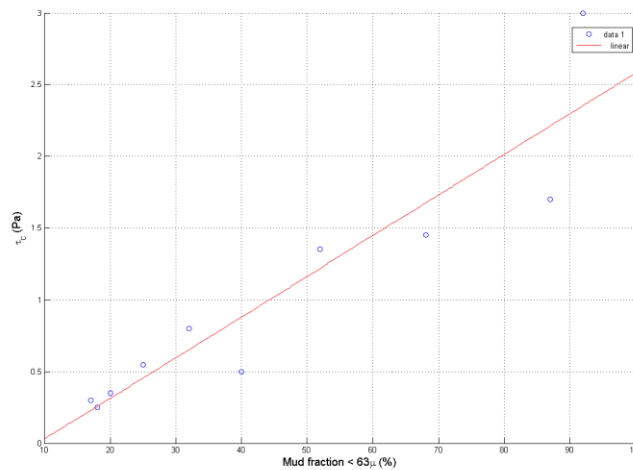
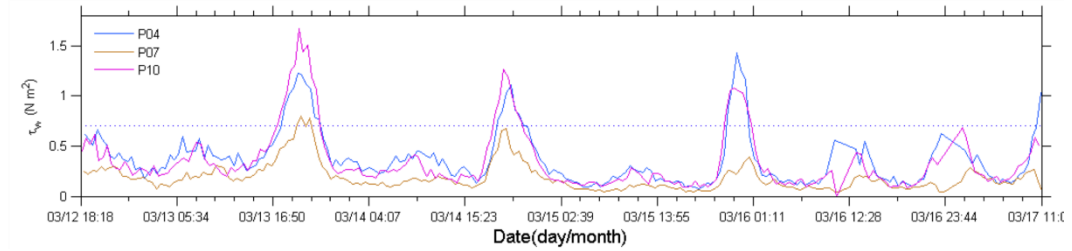


Figure 19: *Erosion threshold of natural mixed sediments near Hirel in the Mont Saint-Michel Bay versus volume fraction of mud (Le Hir et al., 2005). Red line represents linear interpolation of their data.*

The resistance of a mud to erosion is generally parameterised according to the critical shear stress for erosion  $\tau_c$ . Le Hir et al. (2005) studied natural mixed sediments from Mont Saint-Michel Bay with an erosion device (erodimeter) and found that a relationship exists between  $\tau_c$  and the mud fraction (figure 19).

The mud fraction in P7 is around 50 % and corresponds to a critical shear stress for erosion in the range of 1.1-1.2 Pa. When the BSS computed in P7 exceeds this value, sediment is able to be eroded and re-suspended in the water column. Figure 20 highlights the importance of the

attenuation of the BSS: downstream the farm, in location P7, waves and BSS are attenuated through the farm. These BSS often become lower than the critical value for erosion, which will induce a decrease in the erosion flux and thus modifications of the sediment transport rate and sometimes preferential areas of silting up.



*Figure 20: Wave-induced bottom shear stress downstream the farm with regard to wave propagation (sensors P4, P7 and P10). Dotted line represents the value 1.1 Pa.*

## 5. CONCLUSION

The near-field impact of oyster structures on hydrodynamics and the global impact on waves were investigated by means of in-situ measurements in this study.

In the near-field, there is no local wave modification by the presence of the oyster table. But tidal flows are locally modified in terms of intensity and direction: during the flood, current intensities and directions can be respectively affected up to 50 % and up to 15°, and during the ebb respectively up to 40 % and up to 20°.

On the other hand, about the global impact on waves, two cases are distinguished: in the high water level case, long waves are a bit attenuated but not short waves; in the shallow water case, both long waves and short waves are strongly attenuated (significant wave heights divided by 2 or more). Wave-induced bottom shear stresses are often damped in this shallow-water case.

The importance of the bottom shear stresses attenuation is highlighted by means of superficial sediment analysis. The BSS measured downstream the farm with regards to wave propagation often become lower than the critical value of BSS for erosion, which will occurs a decrease in sediment transport rate and sometimes preferential areas of silting up.

The results of this study must be carefully used since they are not representative of all the oyster farming sites in terms of oyster structures layout or bathymetry and topography of the study site.

## Acknowledgements

The authors wish to thank the Région Basse-Normandie and the Région Bretagne for the financial support of this work.

## **References**

- Bassoullet, P., Le Hir, P., Gouleau, D. and Robert, S., 2000.** Sediment transport over an intertidal mudflat: field investigations and estimation of fluxes within the “Baie de Marennes-Oleron” (France). *Continental Shelf Research*, 20, pp. 1635-1653.
- Bertin, X., Chaumillon, E., Sottolichio, A. and Pedreros, R., 2005.** Tidal inlet response to sediment infilling of the associated bay and possible implications of human activities: the Marennes-Oléron Bay and the Maumusson Inlet, France. *Continental Shelf Research*, 25, pp. 1115–1131.
- Cayocca, F., Bassoullet, P., Le Hir, P., Jestin, H. and Cann, P., 2008.** *Sedimentary processes in a shellfish farming environment, Mont Saint-Michel Bay, France*, Sediment and ecohydraulics, Proceedings INTERCOH 2005, pp. 431-446.
- Christie, M. C., Dyer, K. R. and Turner, P., 1999.** Sediment Flux and Bed Level Measurements from a Macro Tidal Mudflat. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49, pp. 667-688.
- Deloffre, J., Verney, R., Lafite, R., Lesueur, P., Lesourd, S. and Cundy, A. B., 2007.** Sedimentation on intertidal mudflats in the lower part of macrotidal estuaries: Sedimentation rhythms and their preservation. *Marine Geology*, 241, pp. 19-32.
- Forrest, B. M., Keeley, N. B., Hopkins, G. A., Webb, S. C. and Clement, D. M., 2009.** Bivalve aquaculture in estuaries: Review and synthesis of oyster cultivation effects. *Aquaculture*, 298, pp. 1-15.
- Guizien K., 1996.** Etude du champ de vitesses sous une et plusieurs plaques soumises à la houle et immergées près du fond , master thesis, 1996, pp. 47.
- Jestin, H., Bassoullet, Ph., Le Hir, P., L’Yavanc, J. and Degres, Y., 1998.** Development of ALTUS, a high frequency acoustic submersible recording altimeter to accurately monitor bed elevation and quantify deposition or erosion of sediments. *Proceedings of the Oceans’ 98 IEEE/OES Conference*, vol. 1/3, pp. 189-194.
- Kervella, Y., Germain, G., Gaurier, B., Facq, J.-V., Cayocca, F. and Lesueur, P., 2009a.** Experimental study of the near-field impact of an oyster table on the flow. *European Journal of Mechanics B/ Fluids*, doi:10.1016/j.euromechflu.2009.09.002.
- Kervella, Y., Germain, G., Gaurier, B., Facq, J.-V., Cayocca, F. and Lesueur, P., 2009b.** Boundary layer development and shear stresses measurements around oyster tables. *Proceedings of the AMT’09 conference*.
- Kim, S.-C., Friedrichs, C. T., Maa, J. P.-Y. and Wright, L. D. , 2000.** Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic doppler velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126 (6), 399-406.
- Le Hir, P., Cann, P., Waeles, B., Jestin, H. and Bassoullet, P., 2005.** Erodability of natural sediments: experiments on sand/mud mixtures from laboratory and field erosion tests. *Sediment and ecohydraulics, Proceedings INTERCOH 2005*, pp.137-153.

- Le Hir, P., Ficht, A., Silva Jacinto, R., Lesueur, P., Dupont, J.P., Lafite, R., Brenon, I., Thouvenin, B. and Cugier, P.**, 2001. Fine sediment transport and accumulations at the mouth of the Seine Estuary (France), *Estuaries*, 24 (6B), pp. 950-963.
- Madsen O. S.**, 1994. Spectral wave-current bottom boundary layer flows. *Proc. ASCE 24th Int. Conf. on Coastal Engineering (ICCE)*, Kobe, Japan, ASCE, pp. 384-398
- Myrhaug, D., Slaattelid, O. H. and Lambrakos, K. F.**, 1998. Seabed shear stresses under random waves: prediction vs estimates from field measurements. *Ocean Engineering*, 25(10), pp. 907-916.
- Patarapanich, M.**, 1984. Maximum and zero reflection from submerged plate. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 110(2), pp. 171-181.
- SeaMER**, 2000. Etude d'impact de la restructuration conchylicole en baie du Mont Saint-Michel, étude courantologique et sédimentologique, rapport SRC Bretagne Nord, pp. 41.
- SOGREAH**, 1986. Amélioration de la mytiliculture dans la Baie de l'Aiguillon. Rapport LCHF.
- Sornin J.M.**, 1981. Processus sédimentaires et biodéposition liés à différents modes de conchyliculture. *Thèse de l'Institut des Sciences de la Nature de l'Université de Nantes*, 188 pp.
- Soulsby, R. L.**, 1983. The bottom boundary layer of shelf seas. In: Johns, B. (Eds), *Physical oceanography of coastal and shelf seas*, Elsevier, 189-266.
- Soulsby, R. L.**, 1995. Bed shear stress due to combined waves and currents. In: Stive, M. J. F., de Vriend, H. J., Fredsoe, J., Hamm, L., Soulsby, R. L., Teisson, C. and Winterwerp, J. C. (Eds), *Advances in coastal morphodynamics, Delft Hydraulics*, 4:20-4:23.
- Soulsby, R. L.**, 1997. Dynamics of marine sands. *A manual for practical applications*. Thomas Telford, London, 249 pp.
- Soulsby, R. L. and Humphery, J. D.**, 1990. Field observations of wave-current interaction at the sea bed. In: Torum, A. and Gudmestad, O. T. (Eds), *Water wave kinematics*, Kluwer Academic Publishers, 413-428.
- Talke, S. A. and Stacey, M. T.**, 2003. The influence of oceanic swell on flows over an estuarine intertidal mudflat in San Francisco Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58, 541-554.
- Tessier, C., Le Hir, P., Lurton, X. and Castaing, P.**, 2008. Estimation de la matière en suspension à partir de l'intensité rétrodiffusée des courantomètres acoustiques à effet Doppler (ADCP). *C. R. Géoscience*, 340, pp. 57-67.
- Trembanis, A. C., Wright, L. D., Friedrichs, C. T., Green, M. O. and Hume, T.**, 2004. The effects of spatially complex inner shelf roughness on boundary layer turbulence and current and wave friction: Tairua embayment, New Zealand. *Continental Shelf Research*, 24 (13-14), 1549-1571.

- Verney, R., Deloffre, J., Brun-Cottan, J. C. and Lafite, R., 2007.** The effect of wave-induced turbulence on intertidal mudflats: Impact of boat traffic and wind. *Continental Shelf Research*, 27, pp. 594-612.
- Whitehouse, R.J.S. and Mitchener, H.J., 1998.** Observations of the morphodynamic behaviour of an intertidal mudflat at different timescales. In: Black, K.S., Paterson, D.M., Cramp, A. (eds) *Sedimentary Processes in the Intertidal Zone. Geological Society, London, Special publication*, 139, pp. 255-271.
- Whitehouse, R.J.S., Bassoullet, P., Dyer, K. R., Mitchener, H.J. and Roberts, W., 2000.** The influence of bedforms on flow and sediment transport over intertidal mudflats. *Continental Shelf Research*, 20, pp. 1099-1124.
- Wiberg, P. L. and Sherwood, C. R., 2008.** Calculating wave-generated bottom orbital velocities from surface-wave parameters. *Computers & Geosciences*, 34 (10), pp. 1243-1262.
- Williams, J. J., Rose, C. P., Thorne, P. D., O'Connor, B. A., Humphery, J. D., Hardcastle, P. J., Moores, S. P., Cooke, J. A. and Wilson, D. J., 1999.** Field observations and predictions of bed shear stresses and vertical suspended sediment concentration profiles in wave-current conditions. *Continental Shelf Research*, 19, pp. 507-536.

## II.1.2. Approche expérimentale

### II.1.2.1. Position du problème. Synthèse bibliographique

Si l'on considère une table à huître de manière schématique, on se rend compte que l'on peut rapidement l'assimiler à une plaque horizontale, poreuse ou non, en omettant la présence des pieds qui occupent une place à priori négligeable d'un point de vue volumique (mais non d'un point de vue dynamique comme nous le verrons plus loin).

Il existe alors une bibliographie très fournie relative aux plaques immergées, notamment au niveau de la modélisation analytique ou numérique (voir section II.1.3). En effet, depuis l'étude de (Stoker, 1957), les plaques horizontales immergées ont été très étudiées pour leur rôle de « breakwater » (brise-lames) afin de protéger des sites côtiers. Les plaques sont alors étudiées en deux dimensions (la dimension transversale est supposée infinie), ce qui revient pour nous à une approximation d'une situation extrême : une houle se propageant perpendiculairement à la direction d'alignement des tables à huîtres (dans cette configuration, les plaques symbolisant nos tables à huîtres ont une longueur de 1 m (longueur des poches à huîtres) dans la direction de propagation des vagues).

Ces études visaient à déterminer les paramètres optimaux (longueur et épaisseur de plaque, hauteur de positionnement,..) en fonction des conditions de houle rencontrées, pour obtenir un coefficient de réflexion élevé (ou coefficient de transmission faible).

Ainsi, (Dick and Brebner, 1968) et (Dick, 1968) ont réalisé des études expérimentales sur des brise-lames rectangulaires immergés soumis à l'action de la houle. Ils se sont rendus compte qu'il existait une perte importante d'énergie de la houle due à la turbulence et au déferlement des vagues, ainsi qu'une modification de la fréquence des houles incidentes (fréquence plus haute de la houle transmise par rapport à la houle incidente). Ils ont aussi mesuré les coefficients de réflexion et de transmission de la plaque en fonction du rapport longueur de plaque sur longueur de l'onde incidente.

(Sendil and Graf, 1974) ont réalisé des expériences sur des plaques flottantes dans un canal à houle et se sont rendu compte que ce dispositif était moins efficace qu'une plaque fixe de même longueur située à proximité de la surface libre.

(Dauer, 1984) a déterminé expérimentalement des coefficients de transmission pour différentes configurations de plaques horizontales et verticales.

(Brossard, 1986) s'est intéressé à l'impact direct de ces plaques sur le fond en termes de dynamique sédimentaire. En étudiant les structures tourbillonnaires générées par le bord de fuite aval d'une plaque horizontale immergée sous la houle par visualisation et vélocimétrie laser, il a montré qu'il pouvait exister un jet vertical à l'aplomb de ce bord de fuite qui créait des zones privilégiées d'érosion.



Depuis les études de (Drouin and Ouellet, 1987) et (Patarapanich and Cheong, 1989), où il a été démontré que plus la plaque était proche de la surface, plus le rendement en termes de réflexion était élevé, les études se sont focalisées sur des plaques situées proche de la surface libre ; ce qui n'est pas nécessairement le cas de figure que l'on rencontre avec les tables à huîtres in-situ, au contraire.

D'autre part, dans cette étude expérimentale menée par (Patarapanich and Cheong, 1989), l'existence d'une longueur de plaque optimale pour la réflexion a été démontrée. Cette longueur optimale est environ égale à une demi-longueur d'onde de la houle incidente (la valeur du coefficient de réflexion dépendant alors de la profondeur d'immersion de la plaque). Nos tables à huîtres ayant une longueur de 1 m et la houle rencontrée sur le terrain possédant une longueur d'onde minimale de l'ordre de 10-15 m par faible profondeur, nous commençons à nous rendre compte qu'une table à huître « seule » constituera un obstacle générant un faible coefficient de réflexion.

Il faut noter que ces résultats peuvent être modifiés par la présence d'un courant, en termes d'intensité de réflexion ou de localisation des maxima de réflexion (Patarapanich and Cheong, 1989).

Une étude expérimentale sur des plaques immergées sous la houle dans un canal, visant à simuler des tables à huîtres, a été réalisée par (Guizien, 1996). Cette étude avait pour but de décrire l'hydrodynamique sous une plaque mais aussi de reproduire des conditions naturelles rencontrées sur un site ostréicole du bassin de Marennes-Oléron en disposant plusieurs plaques régulièrement espacées dans le canal.

#### Caractéristiques du système expérimental :

- Dimensions du canal : 18 m de long par 0.7 m de large et de profondeur
- Echelle de modélisation :  $\frac{1}{4}$  avec respect de la similitude de Froude (voir section III.1.2.2.)
- Dimensions d'une plaque : 40 cm de long, 3.2 cm d'épaisseur et une hauteur sous plaque de 13 cm.
- Hauteur d'eau : 25.5 cm et 51.5 cm
- Caractéristiques des vagues : périodes de 1.65 s à 2.55 s, amplitudes de 3.5 cm à 6 cm
- Mesures sous la plaque par vélocimétrie laser

#### Résumé des conclusions de l'étude (Guizien, 1996):

Dans le cas d'une plaque seule, la théorie linéaire (voir section II.1.3) décrit bien les vitesses orbitales mesurées hors et sous la plaque, et est en bon accord avec le coefficient de réflexion mesuré (environ 2 %).

Dans le cas de plusieurs plaques identiques régulièrement espacées, le regroupement en lotissement a une influence au niveau sédimentaire.

Les résultats sont résumés sur la figure II.4:

- Balayage du fond pour une plaque seule (incompatible avec un dépôt de sédiments).
- Zone de convergence sur le fond avec présence d'un point d'arrêt et débit moyen dans le sens de propagation de la houle pour une plaque située au milieu d'un lotissement dans 51.5 cm d'eau.
- Débit moyen dans le sens inverse au sens de propagation de la houle pour une plaque située au milieu d'un lotissement dans 25.5 cm d'eau.

On voit donc l'importance de la succession de plaques ainsi que de la hauteur d'eau, i.e. de la distance de la plaque à la surface libre, vis-à-vis de l'hydrodynamique sous la plaque. Dans la configuration multi-plaques, il est noté l'apparition de points d'arrêt ou de zones de faibles vitesses sous la plaque près du fond, ayant sans doute un rôle dans le dépôt de sédiments observé in-situ dans les parcs à huîtres.

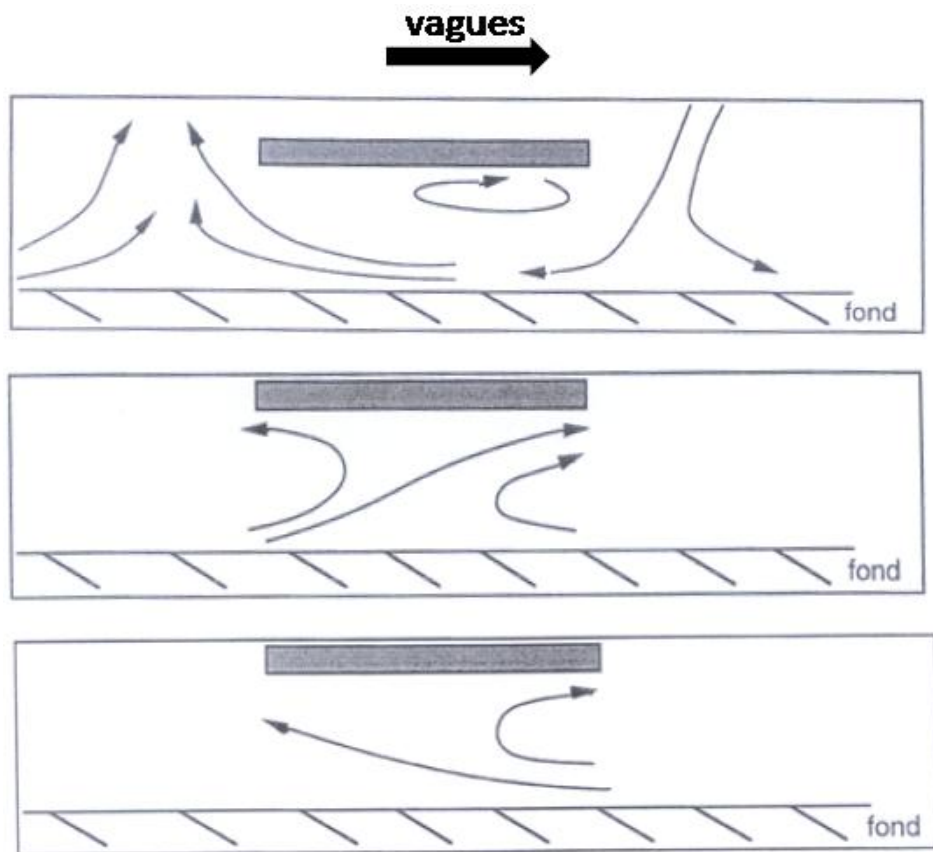


Figure II.7: Circulation moyenne schématisée pour une plaque seule (en haut), pour une plaque au centre d'un lotissement avec 51.5 cm d'eau (au milieu) et pour une plaque au centre d'un lotissement avec 25.5 cm d'eau (en bas), d'après (Guizien, 1996).

### Commentaires sur cette étude :

A notre connaissance, cette étude expérimentale était avant le présent travail la seule visant à reproduire un site ostréicole à l'échelle locale, en tenant compte des conditions naturelles. Elle permet de se rendre compte de l'importance de la succession de plaques (ou de tables) au niveau de l'impact sur l'hydrodynamique proche du fond et sur la dynamique sédimentaire qui en découle.

Néanmoins, les conditions de houle et les hauteurs d'eau sont assez restrictives : période de houle maximale représentée de 5.1 s, amplitude de houle maximale représentée égale à 24 cm et hauteur d'eau maximale représentée de 2 m ; alors que des houles de périodes supérieures à 15 s, d'amplitude de plus de 2 m par plusieurs mètres de profondeur sont enregistrées in-situ sur les sites ostréicoles.

Il faut aussi noter que la géométrie des plaques est un peu « extrême » : longueur simulée de 1.60 m (contre 1 m généralement pour une table in-situ) et hauteur simulée de 52 cm (contre 60-80 cm in-situ). Mais cette étude a malgré tout le mérite de travailler à une échelle proche de la réalité (échelle  $\frac{1}{4}$ ).

Dans le même esprit, nous avons réalisé une expérience de visualisation afin de comprendre les comportements hydrodynamiques inhérents à la présence de plusieurs plaques immergées sous la houle, dans des conditions moins restrictives mais à une échelle plus éloignée de la réalité. Cette expérience est décrite dans la section suivante.

#### II.1.2.2. Expérience de visualisation

L'expérience de visualisation s'est déroulée au canal à houle du Laboratoire de Mécanique, Physique et Géosciences (LMPG) du Havre en novembre 2007, sous la direction de Jérôme Brossard.

L'étude expérimentale menée ici vise à déterminer qualitativement l'influence en termes d'hydrodynamisme de plusieurs tables à huîtres (modélisées par des plaques horizontales) en réponse à des conditions de houle très différentes, mais toutefois réalistes au vu des données que nous possédons (Article section II.1.1).

### Descriptif expérimental :

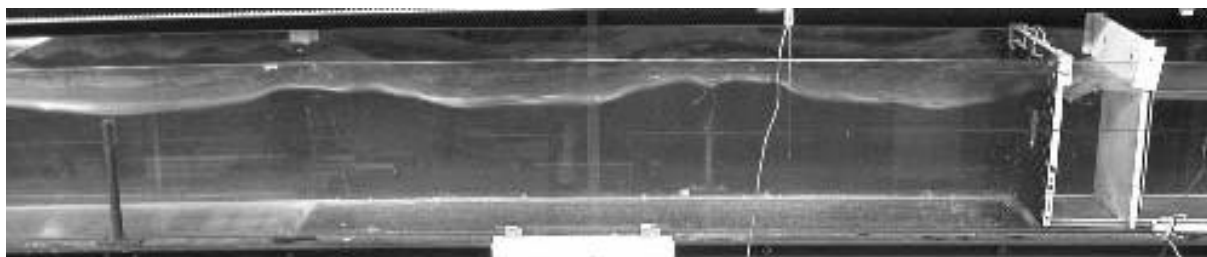


Figure II.8: canal à houle du LMPG Le Havre (laboratoire LOMC).

Les expériences sont réalisées dans un canal à houle de 10 m de long par 0.3 m de large et 0.3 m de profondeur (figure II.5). Il est équipé à une extrémité d'un batteur pour générer de la houle et à l'autre, d'une plage d'amortissement. Les plaques utilisées pour modéliser les tables à huîtres ont une largeur de 2 cm et une épaisseur de l'ordre du millimètre. Les dimensions de ces plaques imposent donc de travailler à l'échelle 1/50<sup>e</sup>, les tables réelles ayant en effet une largeur de 100 cm. En respectant la similitude de Froude (cf partie III.1.2.2), toutes les dimensions *in-situ* seront donc divisées par 50 pour la réalisation de notre maquette et les temps seront alors divisés par  $\sqrt{50}$ .

Lors de notre étude, nous avons aussi comparé deux configurations différentes de placement des tables: la configuration à simples rangées et la configuration à doubles rangées (figure II.6).

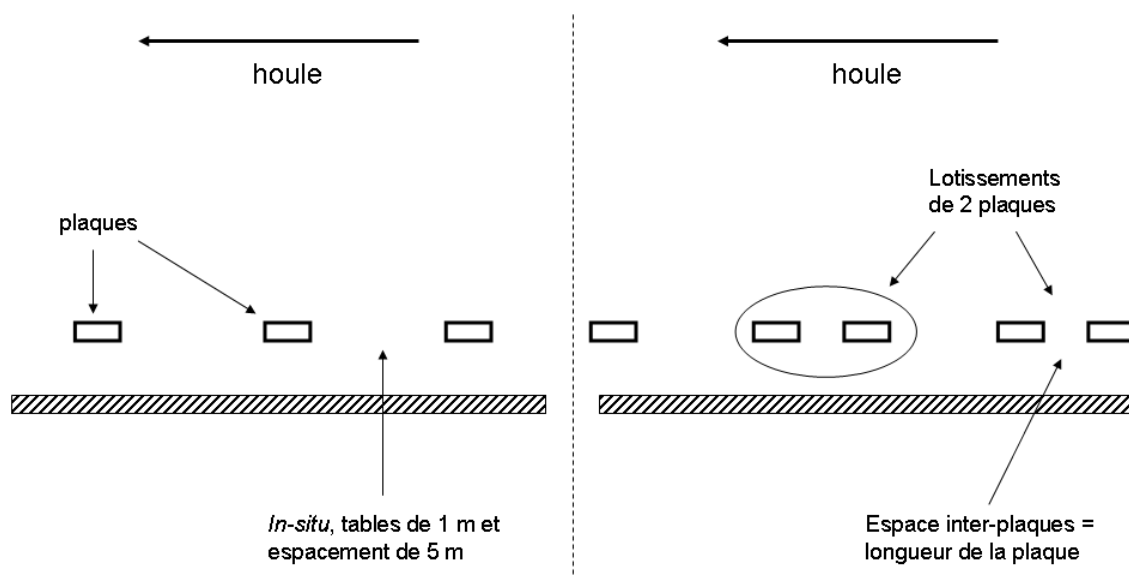


Figure II.9: configurations expérimentales étudiées dans le canal : simples rangées de plaques (à gauche) et doubles rangées (à droite)

Ces deux types de configurations sont fréquents dans le bassin de Marennes Oléron où l'on trouve même des configurations triples ou quadruple rangées, alors que dans le nouveau parc de la Baie du Mont Saint-Michel on trouve exclusivement des rangées simples.

Pour la première configuration, les tables d'une largeur de 1 m (leur longueur est de 100 mètres) sont espacées de 5 m sur le terrain ; ce qui donne 10 cm d'espacement entre les plaques de 2 cm utilisées pour la maquette.

Pour la seconde configuration, des doublets de tables (2 tables espacées de 1 m) sont régulièrement espacés de 5 m ; soit un doublet composé de 2 plaques de 2 cm espacées l'une de l'autre de 2 cm pour la maquette, ces doublets étant eux-mêmes espacés de 10 cm les uns des autres.

D'autre part, la hauteur de ces tables *in-situ* peut différer d'un site à l'autre. Nous considérons donc dans cette étude deux hauteurs de tables: 1 cm et 1.5 cm (soit 50 cm et 75 cm *in situ*).

La hauteur d'eau est fixée à 6,7 cm soit 3,35 m en réalité.

Le canal permet de générer des vagues couvrant une grande partie du spectre fréquentiel: de 0,5 Hz à 2,4 Hz correspondant à des périodes de vagues de 0,4 secondes à 2 secondes (soit des périodes de vagues « réelles » de 2,9 secondes à 14 secondes). On couvre ainsi une très grande partie des conditions naturelles rencontrées au niveau des installations ostréicoles, allant d'un clapot dû au vent jusqu'à une houle bien développée venue du large.

Il faut noter que certaines fréquences sont à éviter (fréquences des modes propres du canal) afin d'éviter l'entrée en résonance (transversale) du canal.

Hauteur d'eau	Hauteurs des plaques	Longueur des plaques	Fréquence des vagues	Amplitude des vagues
6.7 cm	1 et 1.5 cm	2 cm	0.5 à 2.4 Hz	1 à 3 cm

*Tableau II.1 : caractéristiques expérimentales*

#### Méthode de visualisation :

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'aspect hydrodynamique de l'écoulement généré par ces différentes configurations.

Les travaux expérimentaux antérieurs de (Brossard, 1986) sur des plaques immergées en présence de houle ont permis la mise en évidence de la formation de structures tourbillonnaires intenses. Ces structures prennent de l'énergie à la houle

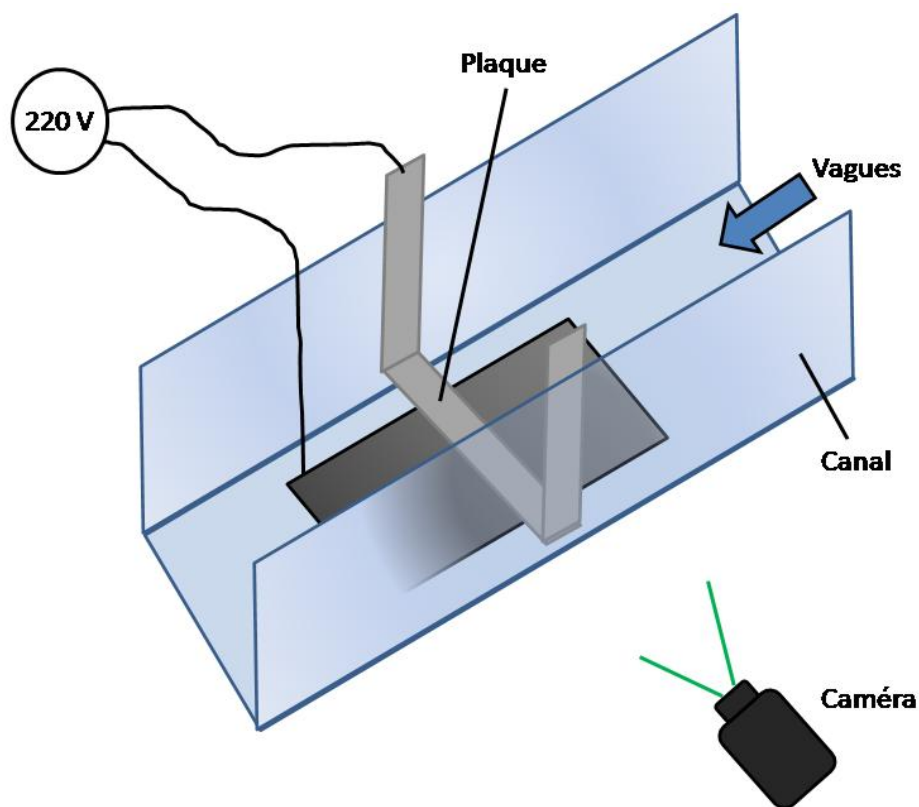
et la dissipent rapidement par turbulence, ce qui entraîne donc un amortissement de cette houle incidente.

Afin de suivre la cinématique de cette formation de structures tourbillonnaires et de comprendre l'organisation globale de l'écoulement, nous utilisons, à l'instar de (Boulier et al., 1997), une méthode de visualisation par bulles d'hydrogène.

Les bulles d'hydrogène sont produites par électrolyse de l'eau (figure II.7) au niveau de chaque plaque (les plaques étant en inox).

Ces bulles ont la propriété de migrer sous l'effet du gradient de pression vers les zones de basses pressions et permettent donc de marquer les cœurs tourbillonnaires (Boulier et al., 1997).

Pour accentuer le contraste entre ces bulles et l'eau, un plan laser vertical au centre du canal est réalisé. Le domaine de visualisation de l'écoulement est donc bidimensionnel.



*Figure II.10: Montage expérimental permettant l'électrolyse de l'eau et la génération de bulles d'hydrogène (plaques en inox en forme de « U » fixées aux parois du canal + grande plaque plane en inox au fond du canal).*

## Résultats:

Dans cette section, nous exposons les résultats par ordre chronologique des mesures réalisées. Toutes les expériences ne sont pas relatées, mais nous nous attachons à décrire, toujours de manière qualitative, les comportements obtenus pour les différentes configurations étudiées, en distinguant l'influence des vagues de basses fréquences d'une part (houle bien établie dans des conditions naturelles) et celle des vagues de hautes fréquences d'autre part (mer/clapot de vent dans des conditions naturelles). Les résultats les plus significatifs sont mentionnés dans le tableau récapitulatif en fin de section.

- Configuration 1: simples rangées et hauteur de tables de 50 cm

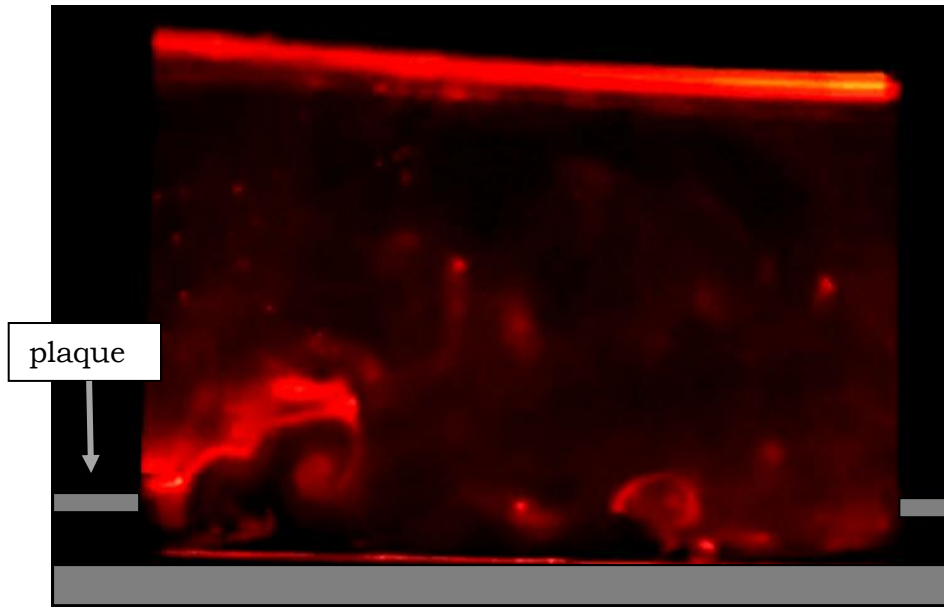
Ce premier type de disposition spatiale de tables se retrouve notamment en baie du Mont Saint-Michel (figure II.8) mais où la hauteur sous tables est plutôt de 70-80 cm (voir dernière partie de cette section). Les alignements de tables ainsi disposées peuvent s'étendre sur plusieurs centaines de mètres, voire sur plus d'un kilomètre, et sont soumis à des vagues couvrant un très large spectre fréquentiel. Le rôle de la fréquence des vagues peut donc être un phénomène prépondérant quant à la compréhension des phénomènes d'affouillement ou de dépôt. Existe-t-il une interaction à petite échelle entre les tables ainsi disposées ?



*Figure II.11: « simples » rangées de table en Baie du Mont Saint-Michel.*

Pour les vagues de basses fréquences, donc de grandes périodes (10-14s, ce qui représente une houle très bien établie venant du large), nous observons des tourbillons en aval ou en amont des plaques selon le moment de l'oscillation, qui ne semblent pas très intenses, mais dont la durée de vie est suffisante pour qu'ils

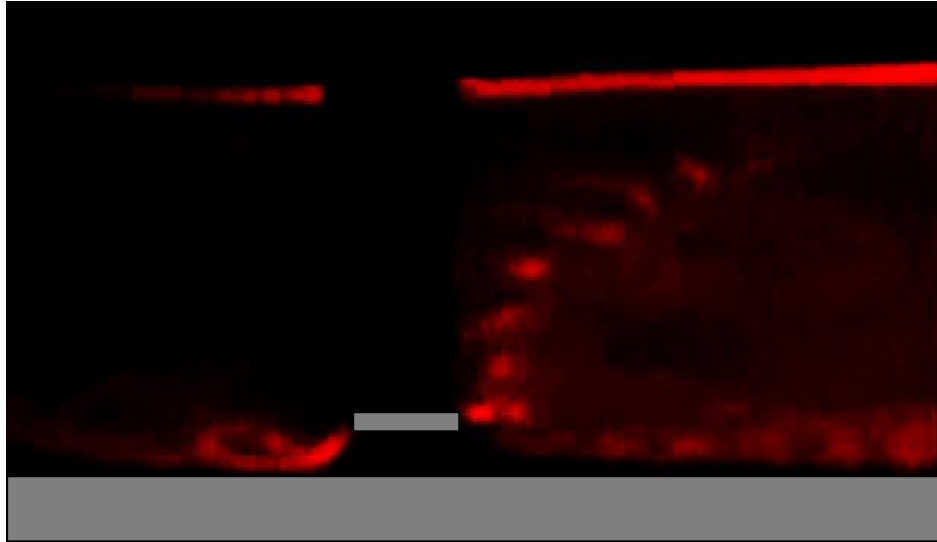
voyagent d'une plaque à la suivante. Les tourbillons sont généralement au nombre de 2 ou 3 et il n'y a pas de formation de jets tourbillonnaires (figure II.9). Notons aussi que le comportement semble légèrement différent d'une plaque à l'autre.



*Figure II.12: simples rangées, hauteur de tables de 50 cm et vagues de basses fréquences*

Pour les vagues de hautes fréquences, donc de courtes périodes (3-4s, ce qui représente une mer de vent plutôt locale), il y a apparition de jets tourbillonnaires en amont et en aval au niveau de chaque plaque (figure II.10). Le jet amont est dirigé vers la surface et entraîne donc une interaction avec cette dernière, et le jet aval, plus intense, est dirigé vers le fond avec lequel il interagit, et se prolonge jusqu'à la plaque suivante ou il rentre en contact avec le jet amont. Les plaques se comportent donc comme une plaque seule, ce qui pourrait être expliqué par les faibles longueurs d'ondes des houles de hautes fréquences. Les tourbillons formant les jets semblent avoir une durée de vie nécessaire pour interagir avec la surface libre, le fond et la plaque suivante. Ce qui signifie qu'il y aura beaucoup de dissipation de la houle pour ces hautes fréquences.





*Figure II.13: simples rangées, hauteur de tables de 50 cm et vagues de hautes fréquences (jet tourbillonnaire aval et interaction avec le fond à gauche de l'image, jet tourbillonnaire amont et interaction avec la surface libre à droite (le rectangle vertical noir étant la plaque en inox))*

En ce qui concerne le phénomène de dissipation des tourbillons, il faut noter qu'au niveau de notre montage, rappelons-le à l'échelle 1 pour 50, celle-ci aura lieu sous forme visqueuse. En effet, nous utilisons de l'eau pour nos expériences, qui représenterait donc à l'échelle réelle un fluide très visqueux. Dans un cas réel, les tourbillons se diffuseront et se dissiperont plus vite et auront donc une durée de vie plus courte. Leur impact sur le fond sera donc minimisé par rapport à l'expérience. Notre étude est donc une étude phénoménologique qualitative. Nous ne pouvons en aucun cas mesurer des paramètres tels que les contraintes sur le fond par exemple.

- Configuration 2: doubles rangées et hauteur de tables de 50 cm

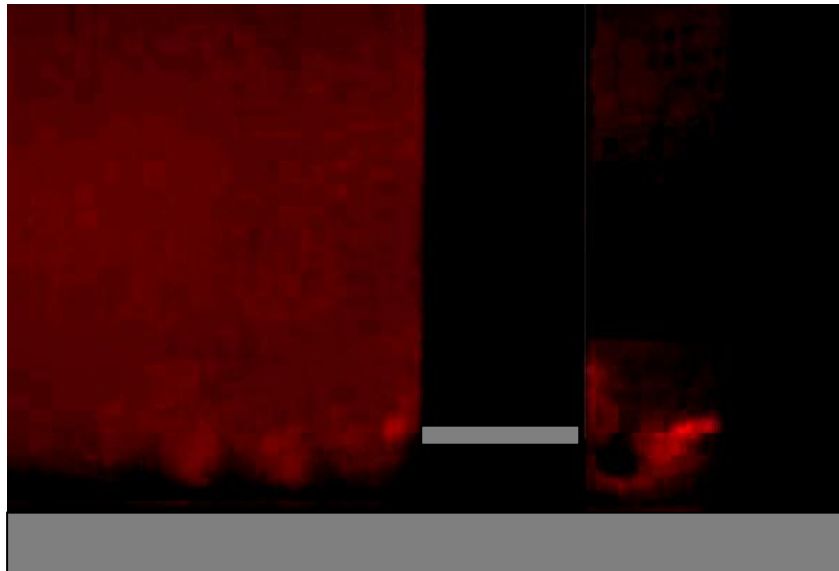
Ce second type de disposition spatiale de tables se retrouve notamment dans le bassin de Marennes-Oléron (figure II.11) ou en baie des Veys.

Ces doubles rangées se comportent-elles différemment des simples rangées vis-à-vis de la houle ? Engendrent-elles des circulations supplémentaires à l'intérieur-même de cette double rangée ?

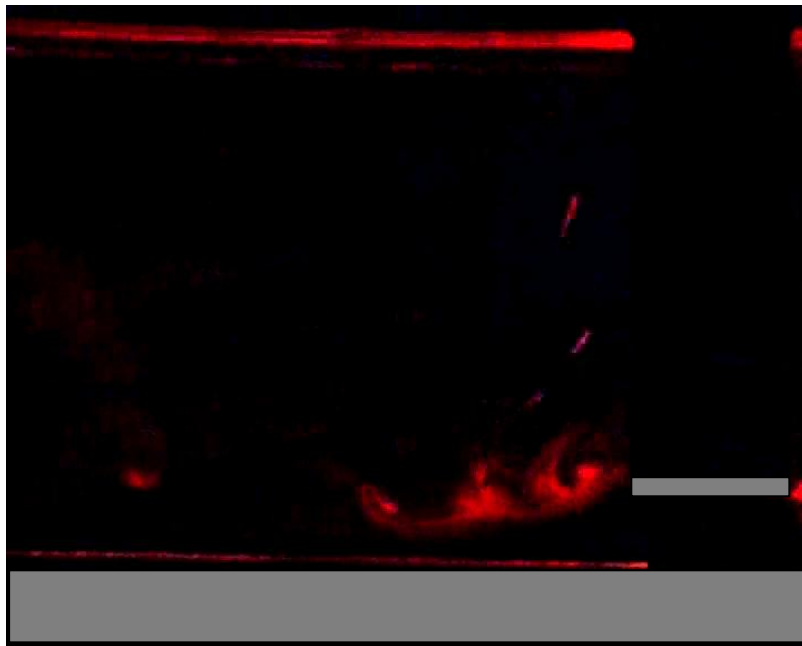


*Figure II.14: « doubles » rangées dans le bassin de Marennes-Oléron*

Pour les vagues de basses fréquences, nous observons des tourbillons ayant une durée de vie très courte et en faible nombre (1 ou 2, figure II.12). Contrairement à la première configuration, ces tourbillons n'ont pas le temps de voyager jusqu'au lotissement de plaques suivant. Notons aussi la présence, au sein des lotissements, de tourbillons inter-plaques ayant la dimension caractéristique de cet espace inter-plaque ou de la plaque elle-même (soit 2 cm).



*Figure II.15: doubles rangées, hauteur de tables de 50 cm et vagues de basses fréquences*



*Figure II.16: doubles rangées, hauteur de tables de 50 cm et vagues de hautes fréquences*

Pour les vagues de hautes fréquences, le comportement observé est le même que pour la précédente configuration à une seule rangée, à deux exceptions près:

- il n'y a pratiquement plus de jets amonts.
- il y a présence de tourbillons inter plaques (figure II.13) de même dimension que pour les vagues de basses fréquences.

Nous voyons donc que ces deux configurations n'engendrent pas la même dynamique tourbillonnaire et n'ont donc pas le même impact sur la houle, que ce soit pour des houles de basses ou de hautes fréquences.

Intéressons-nous maintenant à une hauteur sous tables différente; L'influence de ce paramètre est importante, notamment afin obtenir une valeur de la hauteur optimale de positionnement lors de l'installation des tables par les ostréiculteurs (d'autres mesures seront évidemment nécessaires afin de calibrer finement ce paramètre).

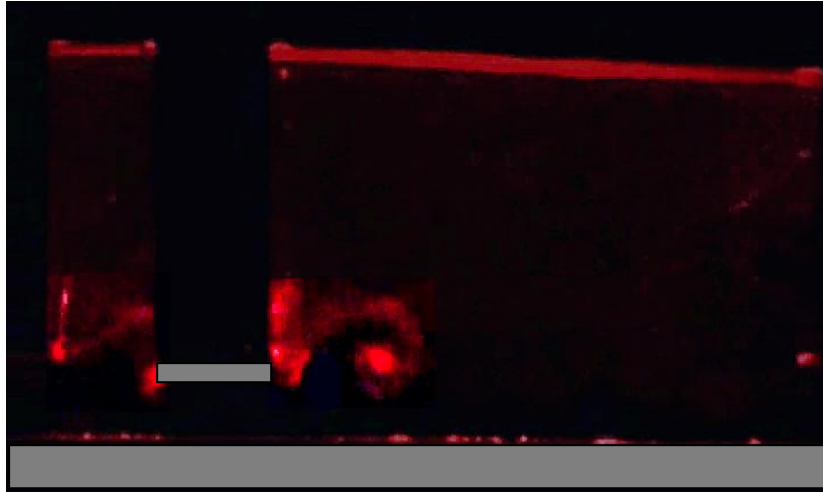
- Configuration 3: doubles rangées et hauteur de tables de 75 cm

Cette seconde valeur de hauteur sous tables semble plus réaliste pour un positionnement initial des tables. Néanmoins, les deux valeurs de hauteur sont observées *in-situ* du fait de l'exhaussement des fonds sur certaines zones (les hauteurs sous tables peuvent alors tendre vers zéro dans certains cas extrêmes, figure II.14).



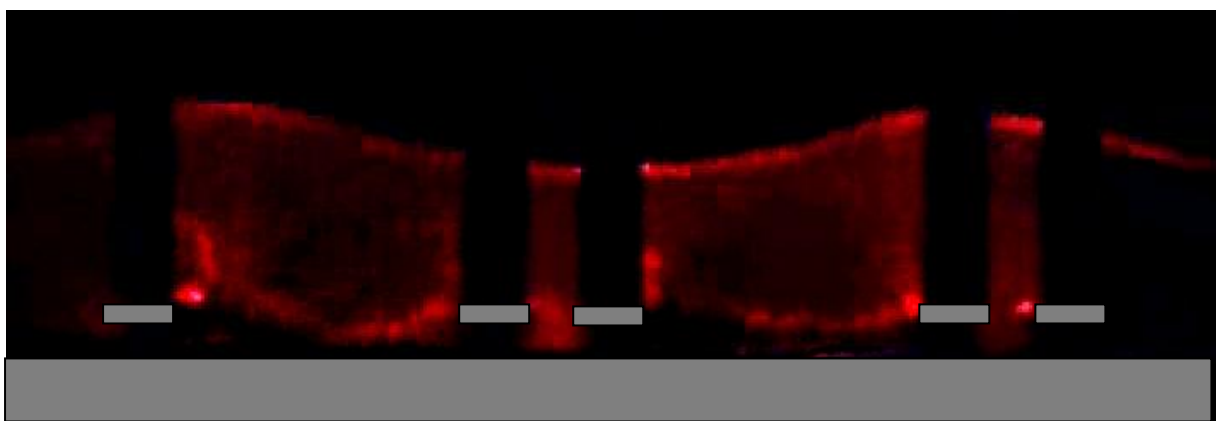
*Figure II.17: Envasement extrême en zone ostréicole, Cancale.*

Pour les vagues de basses fréquences, la dynamique tourbillonnaire semble être la même que pour la hauteur précédente: durée de vie des tourbillons très courte, tourbillons inter-plaques, pas de convection d'un lotissement à l'autre (figure II.15). Une autre chose importante à noter est le fait que les tourbillons présentent les mêmes dimensions caractéristiques que précédemment; les tables étant disposées plus loin du fond, les tourbillons ont donc plus de mal à interagir avec ce dernier dans cette configuration. Cette remarque est très importante car si les tables sont basses *in-situ*, cela pourrait entraîner sous certaines conditions de recirculation (Guizien, 1996), un exhaussement du fond de plus en plus rapide (l'exhaussement augmente, la distance table-fond diminue, l'interaction tourbillons-fond augmente et ainsi de suite) ou des périodes d'alternance entre exhaussement et affouillement du fond par les tourbillons. Notons aussi que le comportement de la plaque seule (plaque la plus en aval) est différent de celui des autres.

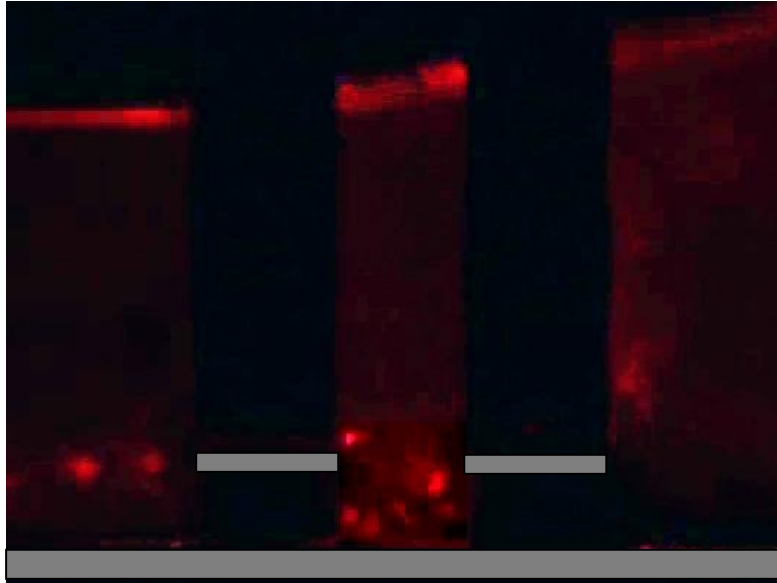


*Figure II.18: doubles rangées, hauteur de tables de 75 cm et vagues de basses fréquences*

Pour les vagues de hautes fréquences, nous observons de très beaux jets tourbillonnaires en amont et en aval comme pour la hauteur précédente mais ces jets, convectés d'un lotissement au suivant, ne pénètrent plus jusqu'au fond. D'ailleurs leur comportement est différent d'un lotissement à l'autre: plus on se trouve en aval du canal (plus loin du batteur générant la houle), plus les jets de tourbillons avals en sortie de plaque ont une trajectoire verticale avant leur convection horizontale (figure II.16). Ils interagissent donc plus faiblement avec les jets en amont. Nous voyons ici un effet collectif des groupes de plaques qui se traduit par une réorganisation de l'écoulement et des structures tourbillonnaires. Les tourbillons inter-plaques semblent quant à eux se propager jusqu'au fond (figure II.17).



*Figure II.19: doubles rangées, hauteur de tables de 75 cm et vagues de hautes fréquences*



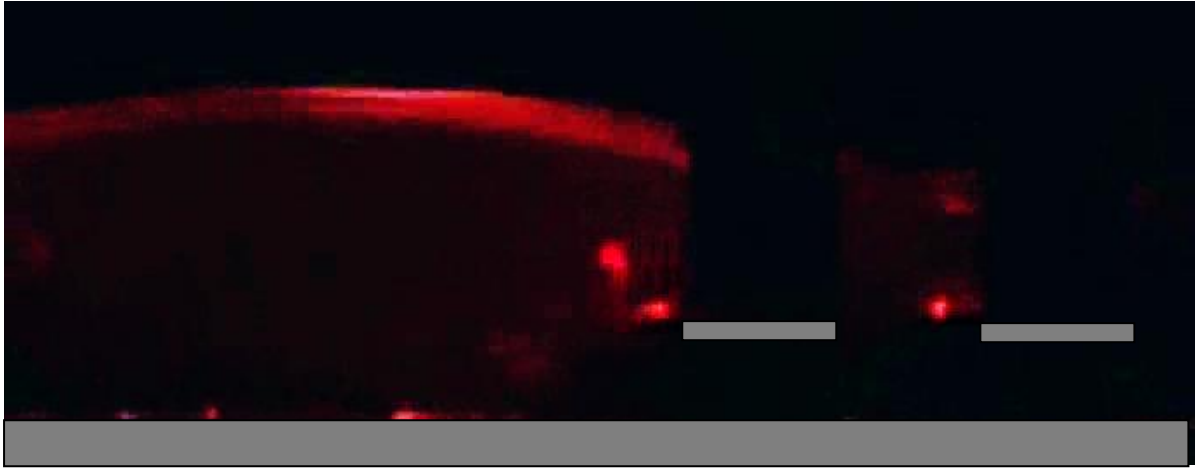
*Figure II.20: doubles rangées, hauteur de tables de 75 cm et vagues de hautes fréquences. Tourbillons inter-plaques*

- Configuration 4: doubles rangées, hauteur de tables de 75 cm et hauteur d'eau plus petite

Nous profitons d'une vidange du canal pour effectuer une mesure un peu en marge des autres expériences: la configuration est la même que précédemment mais avec une hauteur d'eau de seulement 3,3 cm soit en réalité une hauteur d'eau de 1,75 m (Les autres expériences ont lieu à une profondeur de 6,7 cm soit 3,35 m en réalité).

Cette mesure est seulement réalisée avec des vagues de haute fréquence correspondant à une période de vagues réelle de 4s.

Nous n'observons plus de jets tourbillonnaires comme lors de l'expérience précédente avec la hauteur d'eau plus importante. Les tourbillons ont une durée de vie courte et il n'y a donc pas d'interactions entre les différents lotissements (figure II.18).



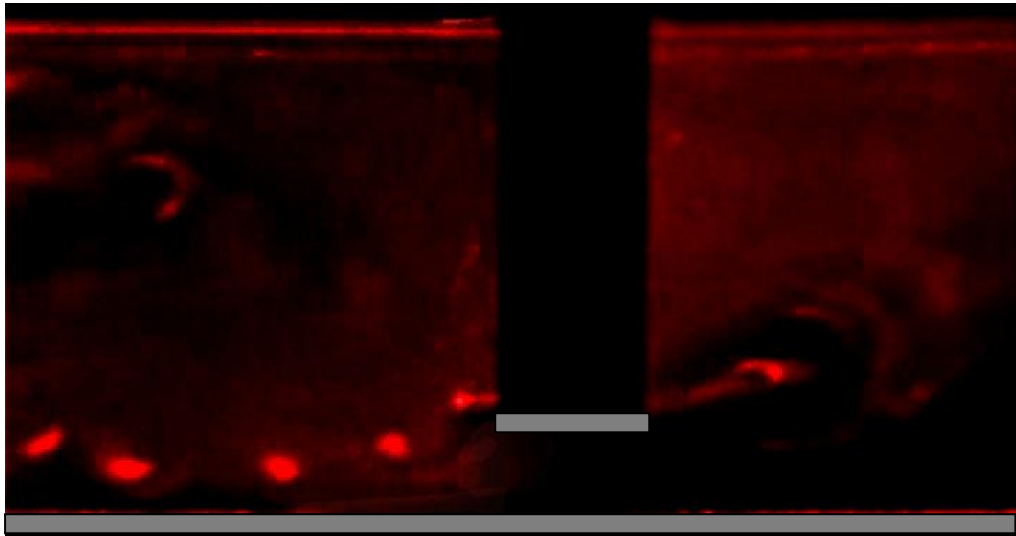
*Figure II.21: doubles rangées, hauteur de tables de 75 cm, faible hauteur d'eau et vagues de hautes fréquences*

- Configuration 5: simples rangées et hauteur de tables de 75 cm

Enfin, la dernière série d'expérience est consacrée à une configuration simulée de tables simples rangées de hauteur 75 cm, avec une hauteur d'eau de 3,35 m.

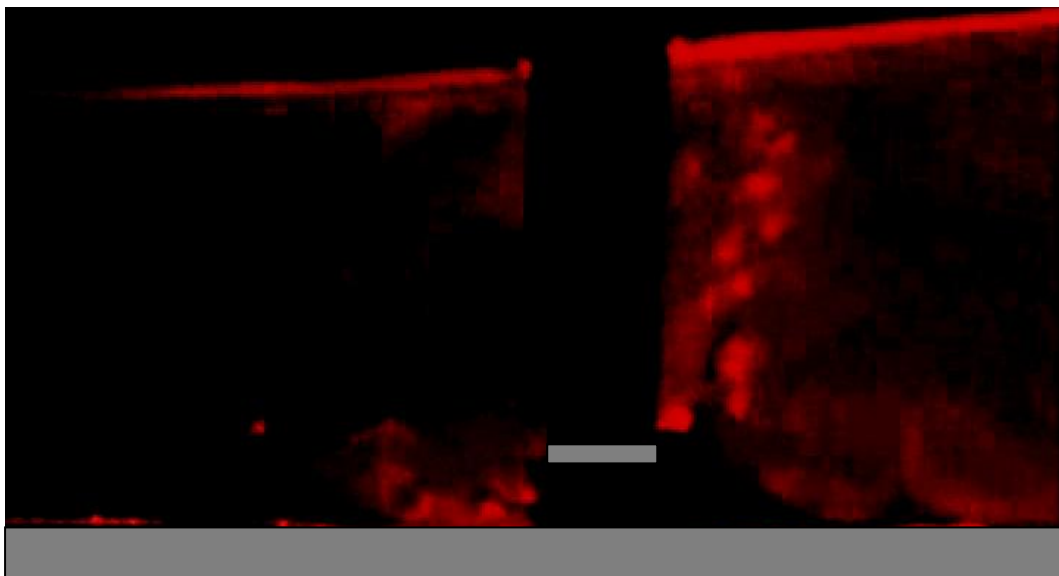
Pour les vagues de basses fréquences, nous observons des tourbillons très bien développés entre la première et la seconde plaque (en les comptant à partir de l'amont), un peu moins entre la seconde et la troisième. Il est ainsi aisé de les compter: 5 tourbillons entre les deux plaques (contre trois pour la même expérience avec une hauteur de plaques/tables différente) soit une dimension caractéristique de l'ordre de celle de la plaque (figure II.19).





*Figure II.22: simples rangées, hauteur de tables de 75 cm et vagues de basses fréquences*

Pour les vagues de hautes fréquences, à l'instar de la configuration doubles rangées, il y a apparition de jets tourbillonnaires amonts et avals convectés d'une plaque à la suivante. Nous remarquons cependant que les jets avals sont bien plus verticaux que lors de l'expérience avec la configuration doubles rangées (sauf pour le cas de la plaque isolée en aval de cette configuration) et vont donc interagir plus fortement avec le fond (figure II.20).



*Figure II.23: simples rangées, hauteur de tables de 75 cm et vagues de hautes fréquences*



En ce qui concerne la comparaison des deux configurations (simples et doubles rangées) à cette hauteur sous table de 75 cm, nous pouvons noter que:

- pour les vagues de basses fréquences, les comportements sont très différents. Les tourbillons ont une durée de vie plus courte avec la configuration doubles plaques; ceci est sûrement dû à la présence des tourbillons inter-plaques.
- pour les vagues de hautes fréquences, il y a développement de jets tourbillonnaires dans les deux cas, mais avec des jets avals plus verticaux dans la configuration simples rangées et donc une interaction plus importante avec le fond. Dans les deux configurations, il y a interaction avec la surface libre.

Que les tables soient placées à une hauteur de 50 cm ou à une hauteur de 75 cm, les conclusions de l'étude sont les mêmes: la dynamique tourbillonnaire est différente d'une configuration à l'autre. Il est difficile d'en dire plus sans une étude quantitative plus élaborée. Nous ne nous aventurerons donc pas à tirer des conclusions quant à la "meilleure" configuration.

Au niveau de la différence des résultats en fonction de la hauteur des tables, il semble que la diminution de hauteur sous tables tende à augmenter les interactions avec le fond et par conséquent les phénomènes d'affouillement, de remise en suspension, voire de dépôt.

	Vagues de basses fréquences (T=4-6 s)	Vagues de hautes fréquences (T=10-12s)
Simples rangées Hauteur tables de 50 cm	Tourbillons peu intenses, convection d'une plaque à l'autre	Jets amonts et avals, nombreuses interactions entre plaques
Doubles rangées Hauteur tables de 50 cm	Tourbillons inter-plaques, durée de vie très courte des tourbillons principaux	Jets surtout en aval des plaques, tourbillons inter- plaques
Doubles rangées Hauteur tables de 75 cm	Mêmes observations qu'à 50 cm, donc moins d'impact sur le fond	Jets amonts et avals, comportements différents à chaque lot
Simples rangées Hauteur tables de 75 cm	Tourbillons bien développés entre 1 <sup>ère</sup> et 2 <sup>ème</sup> plaque (comptage)	Jets amonts et avals, jets avals très verticaux (interaction forte avec le fond)
Doubles rangées, Hauteur tables de 75 cm, hauteur d'eau de 1.75 m	Non étudié	Pas de jets, durée de vie très courte des tourbillons pas d'interaction entre lots

### II.1.2.3. Conclusions

Malgré l'échelle à laquelle cette expérience qualitative a été réalisée, l'importance de la succession de tables, ainsi que de la hauteur de ces dernières, est mise en évidence dans les phénomènes de dissipation d'énergie et d'interactions avec le fond ou la surface libre.

Des études quantitatives sur l'impact d'une ou plusieurs tables à huîtres sur les vagues restent à envisager, notamment pour des configurations moins extrêmes. Néanmoins, ces multiples configurations géométriques ajoutées à la difficulté d'analyse des résultats avec des tables plus « réalistes » rendent ces études très coûteuses en temps. En effet, à partir du moment où l'on a compris un processus et que l'on veut passer à la reproduction de la réalité, les choses se compliquent.

La solution passe donc sûrement par une modélisation numérique, calibrée avec les résultats expérimentaux existants, que ce soit une modélisation numérique simpliste ou une modélisation numérique plus fine, à l'instar de l'émergence des modèles SPH (Smooth Particles Hydrodynamics, (Monaghan, 1988)).

## II.1.3. Etude numérique

### II.1.3.1. Synthèse bibliographique

Depuis les années 1950, de nombreuses études analytiques ou numériques relatant l'utilisation d'une plaque horizontale comme briseur de houle ont vu le jour. Ces modèles supposent que la plaque est uniforme selon la direction transverse à la direction principale de l'écoulement. Pour notre étude, cela revient à une configuration « extrême » qui consiste en une propagation de la houle perpendiculairement à la direction d'alignement des tables.

Heins (1948, 1950) a étudié la diffraction des vagues par une plaque semi-infinie sans épaisseur dans le cadre d'une profondeur finie. Green et Heins (1953) ont étendu les solutions de cette étude au cadre d'une profondeur infinie en utilisant la technique de Wiener-Hopf (résolution des systèmes d'équations intégrales par une décomposition en fonctions analytiques).

Stoker (1957) a été le premier à obtenir des expressions simples des coefficients de transmission et de réflexion d'une plaque rigide soumise à de la houle longue en eau peu profonde. Pour ce faire, il a utilisé la continuité des vitesses horizontales et de la pression dans les régions proches de la plaque, et a exprimé ces coefficients en fonction du rapport longueur de la plaque sur longueur de l'onde incidente.

Takano (1960) a travaillé théoriquement dans le cadre de l'approximation linéaire sur un obstacle parallélépipédique dans un canal à houle à différents degrés d'immersion (à la surface et au fond).

En 1964, Burke (1964) a étendu la technique de Wiener-Hopf au cas d'une plaque fine en grande profondeur. Ses calculs de coefficients de transmission et réflexion étaient basés sur une procédure itérative compliquée.

Ijima et al. (1971) ont présenté une méthode utilisant le développement en fonctions propres pour une plaque située à la surface libre. Dans cette configuration, le domaine fluide était divisé en trois régions distinctes et les solutions étaient obtenues par continuité des potentiels de vitesses et des vitesses horizontales entre chaque région.

Siew et Hurley (1977) ont déterminé une expression analytique des coefficients de réflexion et de transmission d'une plaque pour des houles longues en eau peu profonde en utilisant la théorie linéaire dans le cadre de cette méthode de continuité des développements asymptotiques.

Puis viennent les études de Patarapanich : en 1978 (Patarapanich, 1978), il étudie la réflexion d'une vague par une plaque horizontale en utilisant la méthode des éléments finis. Il détermine de cette façon les maxima et minima de transmission en fonction du ratio longueur de plaque sur longueur de l'onde incidente. Six ans plus

tard, (Patarapanich, 1984) reprend les équations de Siew et Hurley pour les appliquer à une plaque immergée afin de déterminer le flux d'énergie existant autour de celle-ci. Il calcule ainsi les forces et les moments créés par l'action des vagues sur la plaque. Enfin, en 1989, Patarapanich et Cheong (Patarapanich and Cheong, 1989) déterminent de manière théorique et expérimentale les caractéristiques de la transmission et de la réflexion de vagues régulières ou aléatoires sur une plaque.

Notons aussi que Mc Iver and Evans (1985) utilisent les mêmes techniques pour modéliser la diffraction de la houle par une plaque horizontale immergée fixée au sol par des câbles.

Toutes les études évoquées jusqu'alors ne tenaient pas compte de l'épaisseur de la plaque et ne sont applicables que pour certains régimes de vagues.

En 1989, Liu et Iskandarani (Liu and Iskandarani, 1989) étendent la méthode d'Ijima et al. (Ijima et al., 1971) au cas d'une plaque immergée d'épaisseur finie. Mais les solutions restent instables en eaux peu profondes. Ils montrent en 1991 que la méthode du développement en fonctions propres est une technique précise et rapide pour le calcul des coefficients de transmission et de réflexion d'une plaque horizontale immergée soumise à l'action de vagues courtes, et que cette plaque réfléchit mieux les vagues courtes que les vagues longues.

Cette méthode de développement des fonctions propres est rendue applicable à tous les cas de profondeur par (Cheong et al., 1995) en utilisant une méthode d'éléments finis. Elle fut aussi utilisée dans le cadre de plusieurs plaques horizontales situées sur la même verticale afin d'obtenir un brise-lames plus performant (Wang and Shen, 1999).

Ensuite, beaucoup d'études discutant de l'impact des vagues sur la plaque (forces, moments, résistance à l'usure, ..) et non de l'impact de la structure sur les vagues, voient le jour : (Yu et al., 1991) comparent la forme logarithmique et le développement en série de la solution fondamentale de la méthode des éléments aux frontières ; (Parson and Martin, 1992) appliquent des équations intégrales pour calculer les coefficients de plaques immergées inclinées selon différents angles ; (Yueh and Kuo, 1993) déterminent les forces de pression et de sustentation générées par des vagues sur une plaque ; en utilisant le développement en fonctions propres des potentiels de vitesse, (Kojima et al., 1994) calculent les forces linéaires et non-linéaires exercées par les vagues sur une plaque, en ajoutant des termes de dissipation d'énergie due aux tourbillons générés aux extrémités de la plaque ainsi que celle due au déferlement des vagues ; (Yu, 1995) mènent d'ailleurs une étude spécifique à ce déferlement d'une vague au-dessus d'une plaque horizontale ; (Chen et al., 2002) appliquent une méthode d'éléments aux frontières en utilisant l'équation modifiée d'Helmholtz pour étudier le mouvement des vagues au-dessus d'un brise-lames de faible épaisseur ; enfin, (Porter, 2002) approxime numériquement la solution pour des vagues de faible amplitude par la méthode de Galerkin.

Parallèlement à ces études, de nombreux types de brise-lames poreux ont été analysés. Ces brise-lames, bien qu'étant de dimensions toujours plus importantes que celles de nos tables, se rapprochent plus de notre géométrie par la philosophie des mécanismes qui s'y déroulent ; les poches à huîtres peuvent en effet être assimilées à des plaques poreuses de par la multitude de mailles qu'elles présentent et donc de la possibilité pour l'écoulement de les traverser.

(Dick, 1968; Dick and Brebner, 1968) ont réalisé des études expérimentales sur des brise-lames immergés poreux ou non. Ils concluent en l'existence d'un coefficient minimum de transmission dans le cas d'une structure poreuse, qui n'existe pas pour la même structure imperméable. (Yu and Chwang, 1994) ont déterminé, en utilisant une méthode d'éléments aux frontières, que la réflexion des vagues pouvait être supprimée en utilisant une porosité appropriée de la plaque. (Kakuno et al., 1998) ont réalisé et comparé des tests théoriques et expérimentaux sur une plaque horizontale immergée et perforée. Enfin, (Yip and Chwang, 1998) ont mené une étude sur la façon de contrôler des vagues à l'aide d'une plaque perforée mobile.

Notons que dans toutes ces études, qu'elles portent sur des plaques poreuses ou non, les dimensions des structures ne sont pas du tout comparable à notre cas (longueur de plaque de l'ordre de la longueur de l'onde incidente).

Afin d'avoir une idée des coefficients de transmission et de réflexion des vagues dus à notre table à huîtres, nous utilisons le modèle analytique de (Patarapanich, 1984), repris par (Guizien, 1996) dans le cas d'une plaque d'épaisseur finie. Notre table est alors modélisée par une plaque horizontale imperméable. Ce modèle est basé sur la théorie linéaire des vagues et utilise le développement en fonctions propres des potentiels de vitesse. La continuité de ces potentiels de vitesse ainsi que des vitesses horizontales est assurée en chaque point du domaine fluide. Notons aussi que le fluide est supposé incompressible et non visqueux.

### II.1.3.2. Modèle analytique de la table sous la houle

#### Description et formulation théorique du problème :

On considère le domaine fluide  $\Omega$  compris entre la surface libre et un fond rigide, la direction  $x$  étant illimitée. On fait l'hypothèse d'un fluide ayant un mouvement irrotationnel. Ceci implique l'existence d'un potentiel de vitesse  $\varphi(x,y,t)$  qui décrit complètement l'écoulement. Par définition de  $\varphi$ , le vecteur vitesse est donné par :  $u = \nabla\varphi$ . Aussi, l'équation de continuité devient :

$$\nabla \cdot u = \Delta\varphi = 0, (x,y) \in \Omega \quad (1)$$

Le domaine  $\Omega$  est divisé en quatre régions (figure II.21). Dans chaque région, le potentiel de vitesse doit satisfaire l'équation de continuité ainsi que les conditions cinématiques en surface libre et au fond :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{\partial \eta}{\partial t}, \quad y = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0, \quad y = -d \quad (3)$$

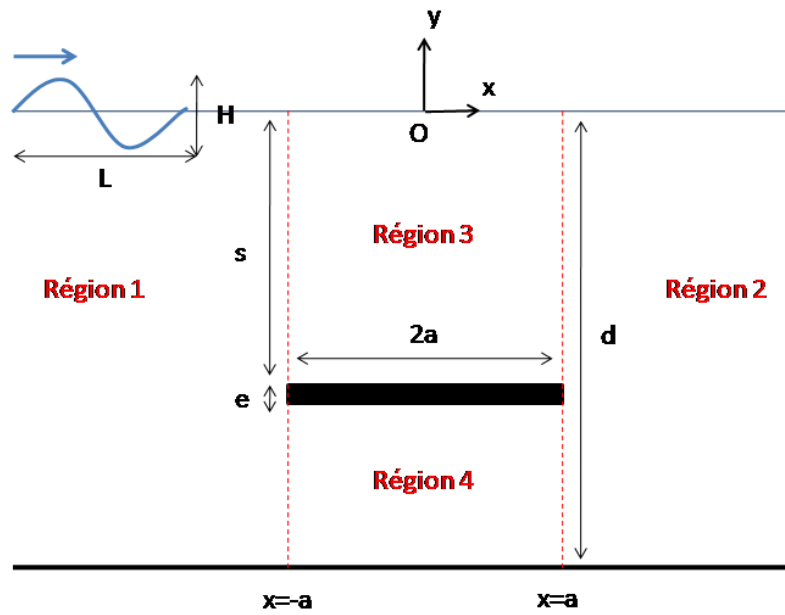


Figure II.24 : schéma de la plaque immergée sous la houle et décomposition du domaine fluide

le fond étant plat et immobile. Nous rappelons d'autre part que nous sommes dans le cadre de la théorie linéaire des vagues et que les termes non-linéaires sont donc occultés.

En assumant que le fluide est non visqueux et en négligeant les tensions de surface, on peut écrire la condition dynamique en surface libre :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + g\eta = 0, \quad y = 0 \quad (4)$$

Où  $g$  est l'accélération de la pesanteur.

En combinant les équations (2) et (4), on obtient une seule condition en surface libre :

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0, \quad y = 0 \quad (5)$$

Ces équations ((1), (3) et (5)) sont ensuite exprimées et résolues dans chacune des quatre régions (cf annexe 1).

Les vitesses en chaque point du domaine sont obtenues, ainsi que l'élévation de la surface libre et les coefficients de transmission et réflexion de la plaque (figure II.22).

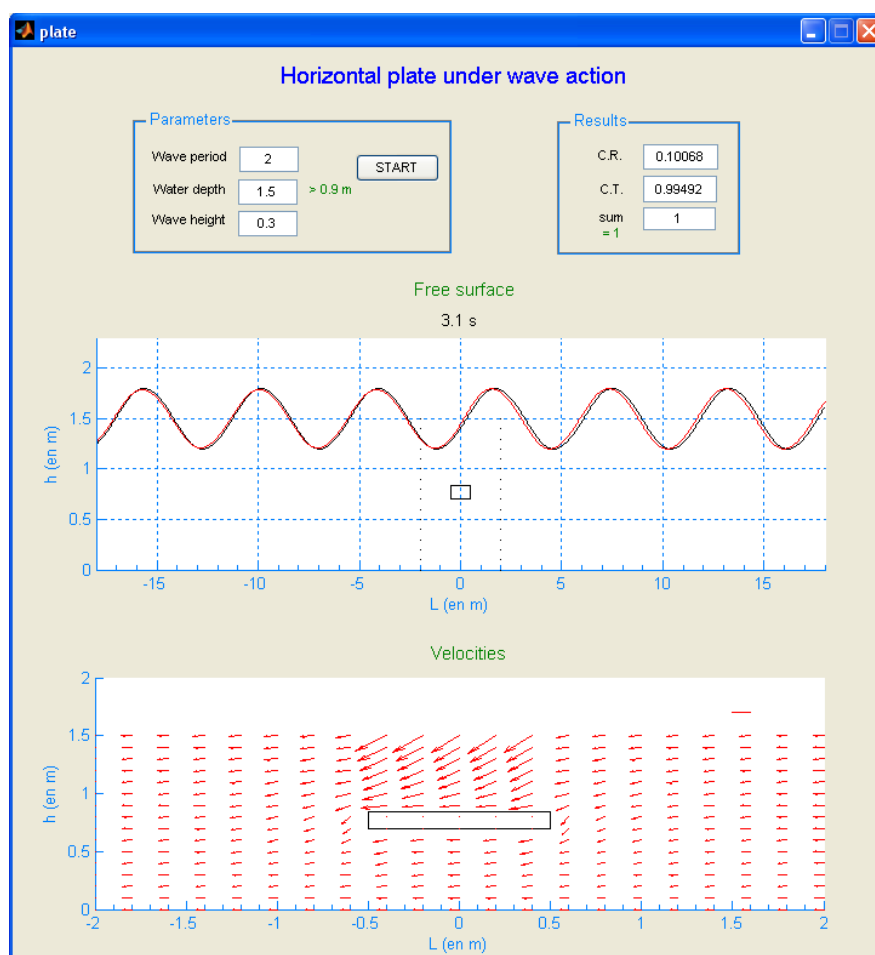


Figure II.25: visualisation des résultats du modèle analytique.

## Résultats :

En se plaçant à une hauteur d'eau faible (1.20 m) par rapport à la hauteur de la table ( $0.70 + 0.14 = 0.84$  m) et pour une amplitude de vague incidente non-négligeable (0.30 m), nous voyons (figure II.23) que le coefficient de transmission de la plaque n'est atténué que pour des périodes de vagues très faibles (autour des 1.7 secondes), rarement rencontrées *in-situ*. Pour ces conditions extrêmes de hauteur d'eau et de période (1.20m et 1.7 s, alors qu'en Baie du Mont Saint-Michel par exemple, le marnage est de 14 m et les vagues rencontrées ont des périodes de 3 à 15 s), le coefficient de transmission est atténué de 8 % seulement.

Autrement dit, à l'échelle des conditions naturelles de marnage et de vagues incidentes, une table seule ne constitue pas un brise-lames efficace et n'entraîne donc pas de modification significative des vagues.

Ceci s'explique facilement par le faible rapport de sa longueur (1 m) sur la longueur d'onde de la vague incidente (de la dizaine à la centaine de mètres).

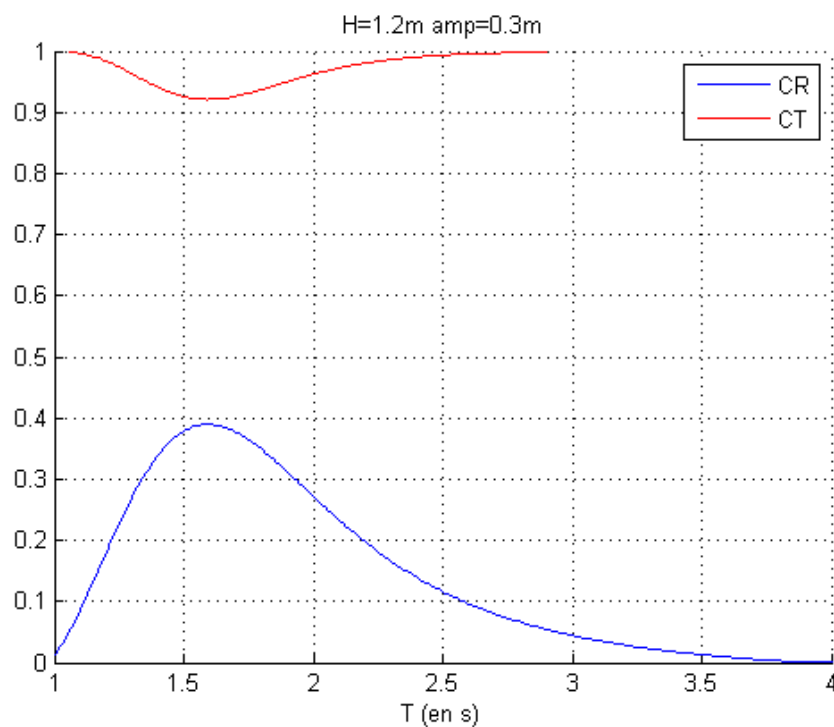


Figure II.26: coefficients de transmission (CT) et de réflexion (CR) de la plaque en fonction de la période de la vague incidente, pour une hauteur d'eau de 1.20 m et une amplitude de vague de 0.3 m.

### II.1.3.3. Vers un modèle numérique plus complet de la table sous la houle



Le modèle analytique présenté précédemment, basé sur de nombreuses hypothèses simplificatrices, a le mérite de donner un ordre d'idée des phénomènes inhérents à la présence de la table et de voir le faible impact que celle-ci a sur les vagues incidentes.

Pour aller plus loin dans la modélisation à petite échelle, des essais ont été réalisés à l'aide du logiciel de dynamique des fluides FLUENT (cf section III.1.3 pour plus de détails).

Un canal numérique diphasique de 10 m de long sur 2 m de haut est modélisé. Une plage d'amortissement numérique de 2 m de long est ajoutée en bout de canal (à droite sur la figure II.24). Le code de calcul résout les équations de Navier-Stokes moyennées (RANS) et modélise la surface libre à l'aide d'une méthode VOF (Volume Of Fluid) pour prendre en compte les effets non-linéaires comme ceux dus au déferlement des vagues. Une houle linéaire d'Airy est générée à la gauche du canal et se propage ensuite grâce à la gravité. La table à huîtres est modélisée par une plaque de 1 m de long et de 15 cm d'épaisseur (un canal numérique sans plaque avait été testé au préalable).

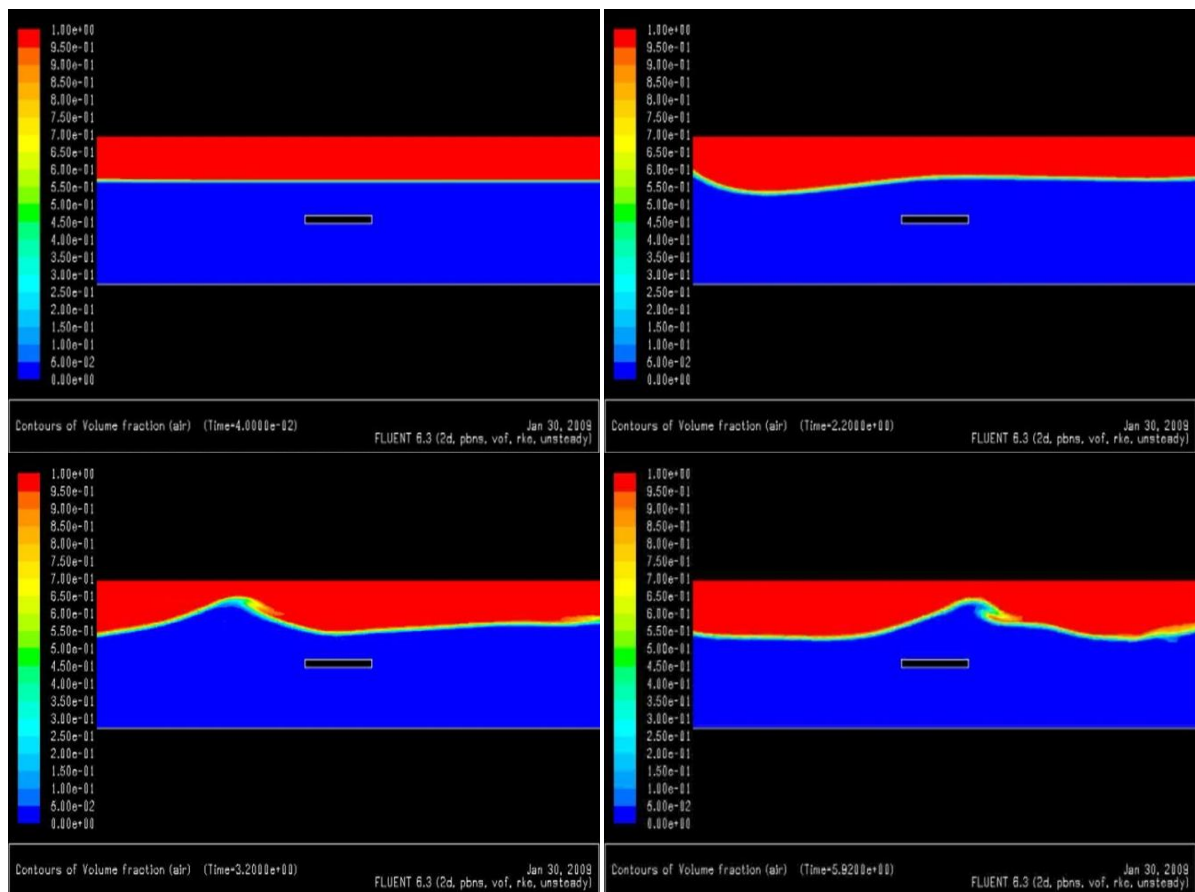


Figure II.27: résultats de la simulation FLUENT pour un canal numérique diphasique de 10 m de long avec une plaque de 1 m. La couleur bleue signifie que la maille est remplie de 100% d'eau alors que la couleur rouge signifie que la maille est remplie de 100 % d'air. Les images correspondent à des temps de simulation de respectivement 0 s, 2.2 s, 3.2 s et 5.9 s.

Les premiers résultats sont présentés sur la figure II.24. L'eau est représentée en bleu et l'air en rouge ; les autres couleurs correspondant à des zones de mélange air/eau.

Nous observons que malgré la bonne génération et propagation des vagues, de nombreuses réflexions dues au canal existent. D'autre part, le coût de calcul est très élevé : une heure de calcul environ pour simuler 1 s de propagation (dans une seule configuration de hauteur d'eau et de période de vague), sachant que la convergence des résultats est obtenue au bout d'environ 70 s de propagation.

La modélisation d'un canal numérique sous FLUENT a donc besoin d'être améliorée et surtout calibrée par des mesures expérimentales appropriées.

Au vu du temps que cela prendrait et surtout au vu du faible impact qu'une table seule semble avoir sur les vagues, nous décidons de concentrer nos efforts sur une modélisation à plus grande échelle spatiale (cf chapitre V).

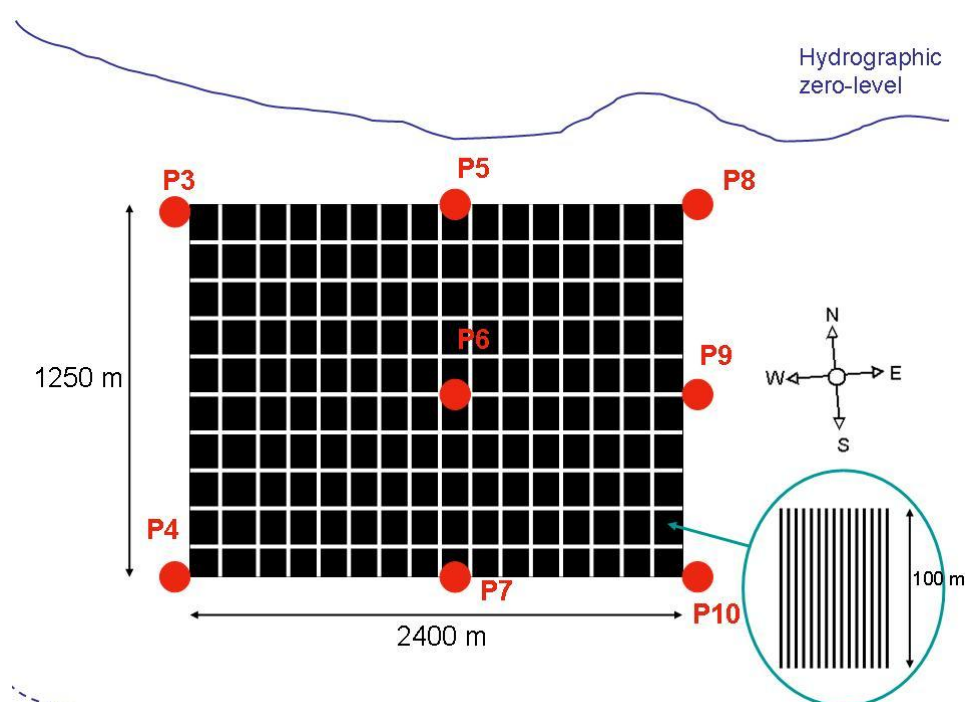
Notons néanmoins l'émergence de modèles particuliers, notamment les modèles SPH (Smooth Particles Hydrodynamics), qui semblent très prometteurs pour la modélisation multiphasique, mais qui en sont encore au stade du calibrage et qui sont très lourds en termes de temps de calcul.

## II.2. Moyenne échelle : compréhension des phénomènes à l'échelle d'un parc ostréicole

Cette partie relate les mesures in-situ effectuées en Baie du Mont Saint-Michel durant l'hiver 2007 visant à déterminer l'impact des structures ostréicoles sur les vagues à l'échelle globale, c'est-à-dire l'influence du parc dans son intégralité sur les vagues.

Les principaux résultats de cette partie sont décrits en section II.1.1 dans l'article « *The impact of oyster structures on hydrodynamics in a macro-tidal environment* » (soumis).

Dans cet article, la partie *global impact of structures on waves* traite de l'impact du parc ostréicole complet sur la propagation des vagues. La stratégie pour évaluer cet impact était de mesurer les vagues en amont, au milieu et en aval du parc, ainsi qu'autour de ce dernier. Pour ce faire, huit capteurs de pression ALTUS (Jestin et al., 1998) sont positionnés comme indiqué sur la figure II.25.



### Caractéristiques des appareils de mesure :

Fréquence de mesure	Longueur des bursts	Cadence des bursts	Gamme de mesure	Précision de la mesure	Asservissement à la pression
2 Hz	1042 mesures (soit 8mn40s)	15 mn	0-25 m	+/- 8 cm	oui

### Résumé de l'article (partie impact global sur les vagues) :

Les mesures de vagues sur des radiales long-shore et cross-shore situées dans le parc ostréicole et à l'extérieur de ce parc ont révélé une atténuation significative des vagues par l'ensemble des tables à huîtres. Les résultats sont exprimés en fonction du paramètre  $\beta$  qui est le rapport entre la hauteur de la table  $h$  et la hauteur d'eau  $d$  (figure II.26):

$$\beta = \frac{h}{d}$$

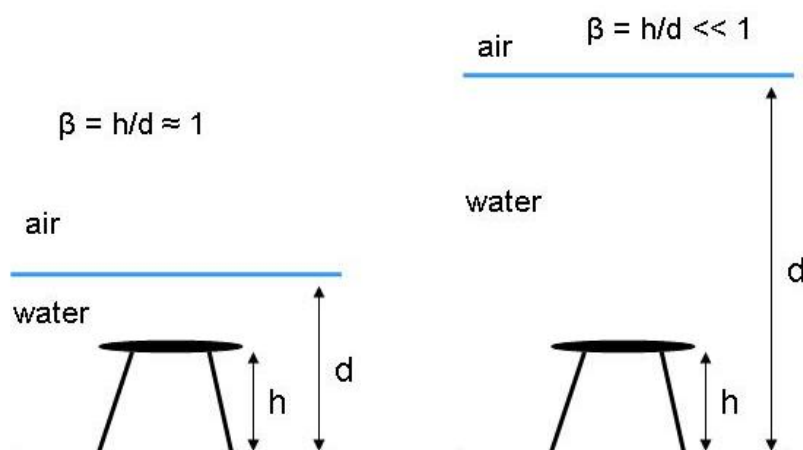


Figure II.29: schéma du cas « Faible hauteur d'eau » (à gauche) et du cas « Grande hauteur d'eau » (à droite).

- Cas d'une « Grande hauteur d'eau »,  $\beta \ll 1$  :

Les vagues longues (périodes supérieures à 7 s) sont atténuées : 75 % des vagues longues sont atténuées entre 20 % et 40 % (en termes de hauteur significative).

Les vagues courtes sont peu atténuées : 79 % des vagues courtes présentent une atténuation inférieure à 10 %.

- Cas d'une « Faible hauteur d'eau »,  $\beta \approx 1$  :

Les vagues longues et les vagues courtes sont très atténuées : respectivement 98 % et 97 % de ces vagues présentent une atténuation supérieure à 20 %, et plus de la moitié des vagues incidentes voient leur hauteur significative divisée par 2 ou plus.

Dans ce cas, les contraintes de cisaillement sur le fond induites par les vagues longues sont significativement réduites, et celles induites par les vagues courtes deviennent quasi-inexistantes.

Contrairement aux conclusions de la partie « petite échelle », l'impact des structures ostréicoles à moyenne échelle (échelle du parc entier) sur les vagues est très significatif. D'où la nécessité de modéliser les structures à cette échelle afin de représenter cette atténuation et de prendre en compte ces structures dans un modèle à l'échelle d'une baie.

## Ce qu'il faut retenir de l'impact des structures ostréicoles sur les vagues

### ➤ En champ proche :

Les mesures réalisées in-situ révèlent qu'il n'existe pas de modification significative des vagues par la présence d'une table à huîtres.

Ces mesures sont confirmées par des expériences en canal à houle (Guizien, 1996) qui présentent un coefficient de réflexion d'une plaque (simulant une table à huîtres) égal à 2 % seulement par faible hauteur d'eau. Au point de vue sédimentaire, un balayage du fond incompatible avec un dépôt de sédiments est observé pour une plaque seule. L'importance de la succession de plaques (ou de tables) est aussi mise en avant, dans des conditions d'eaux peu profondes, pour la dynamique sédimentaire qu'elle engendre près du fond.

Une expérience de visualisation dans des conditions de marnage et de houle représentatives du milieu naturel, mais à une échelle éloignée de la réalité, a été mise en œuvre (canal à houle du LMPG Le Havre, 2007). Cette étude permet de visualiser les différents phénomènes inhérents à plusieurs configurations d'aménagement ostréicole (simples et doubles rangées de tables, différentes hauteurs sous tables) mais nécessite des études quantitatives complémentaires.

Un modèle analytique simple a permis de démontrer qu'une table seule (modélisée par une plaque horizontale) n'entraînait pas de modification significative des vagues (hormis dans des conditions de périodes de vagues et de hauteur d'eau très restrictives que nous n'avons pas rencontrées in-situ) et confirme donc aussi les mesures in-situ.

Une modélisation numérique plus fine est envisageable mais reste très coûteuse par rapport aux résultats escomptés au vu des précédentes conclusions.

### ➤ A l'échelle du parc :

Les mesures in-situ révèlent un impact significatif des structures sur les vagues (ainsi que sur les tensions de cisaillement sur le fond en résultant).

Deux cas sont distingués : un cas où le rapport hauteur de table à huîtres / hauteur d'eau est petit devant 1, et un cas où ce rapport est de l'ordre de 1.

Dans le 1<sup>er</sup> cas, les vagues longues sont atténuées mais les vagues courtes sont peu affectées.

Dans le 2<sup>nd</sup> cas, tous les types de vagues sont très atténués.

Il apparaît donc comme nécessaire de modéliser les structures à cette échelle d'un parc ostréicole.



# Chapitre III: Impact des installations ostréicoles sur les courants

## Contenu :

### **Echelle locale : étude des phénomènes en champ proche**

- *Mesures in-situ*
- *Approche expérimentale*
- *Etude numérique*

### **Moyenne échelle : compréhension des phénomènes à l'échelle d'un parc ostréicole**



### III.1. Echelle locale : étude des phénomènes en champ proche

Cette partie relate les mesures in-situ, les études expérimentales ainsi que la modélisation analytique ou numérique visant à déterminer l'impact des structures ostréicoles sur les courants en champ proche. Dans ces différentes approches, nous nous intéresserons donc aux effets d'une, deux voire trois tables à huîtres sur les courants.

#### III.1.1. Mesures in-situ

Les résultats principaux de cette partie sont décrits en section II.1.1 dans l'article « *The impact of oyster structures on hydrodynamics in a macro-tidal environment* ».

Dans cet article, la partie « *near-field impact of structures on hydrodynamics* » traite des différences locales d'intensité ou d'orientation du courant engendrées à une échelle spatiale très locale par la présence d'une table à huîtres. Pour ce faire, un courantomètre à effet Doppler (ADV) a été positionné sous une table et un autre ADV au centre d'une allée délimitée par deux tables (cf figures III.1 et III.2).

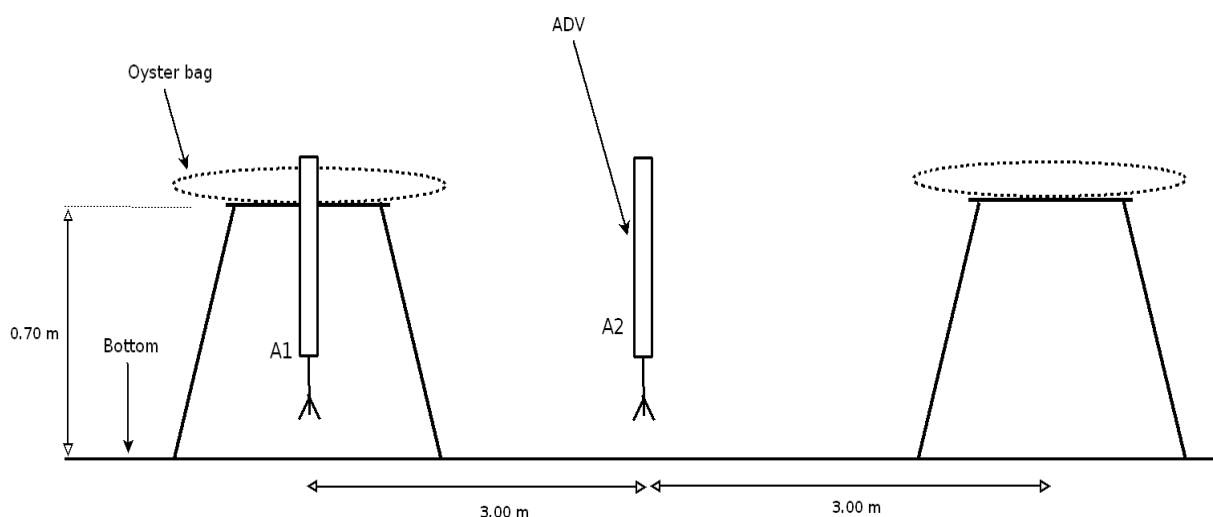


Figure III.1: Schéma (vue de côté) des appareils de mesure situés au centre d'une installation ostréicole en Baie du Mont Saint-Michel.

### Caractéristiques des appareils de mesure :

- ADV A1 (Vector Nortek, situé sous la table) :

Fréquence de mesure	Longueur des bursts	Cadence des bursts	Batterie(s)	autonomie	Asservissement à la pression
4 Hz	1040 mesures (soit 4mn20s)	10 mn	50 Wh + 500Wh	18 jours (mémoire limitante)	non

- ADV A2 (Vector Nortek, situé dans l'allée) :

Fréquence de mesure	Longueur des bursts	Cadence des bursts	Batterie(s)	autonomie	Asservissement à la pression
4 Hz	520 mesures (soit 2mn10s)	20 mn	50 Wh	23 jours (batterie limitante)	non

Les 3 composantes de la vitesse ainsi que leurs fluctuations respectives ont été mesurées à 5 cm du sol pendant 15 jours.

### Bref rappel du principe de la mesure par ADV :

La mesure effectuée est basée sur l'effet Doppler (Verney, 2006) : l'ADV envoie via un émetteur central une onde acoustique qui se propage dans l'eau chargée de particules en suspension. Cette onde est réfléchiée avec un déphasage lié à leur vitesse de déplacement. Trois récepteurs enregistrent ce déphasage entre l'onde émise et l'onde réfléchiée, et quantifient les composantes tridimensionnelles (u,v,w) de la vitesse représentative des particules, et donc de l'écoulement. La précision de la mesure est de l'ordre de 1 mm.s<sup>-1</sup> grâce à la petite taille du volume de mesure.

L'ADV est d'autre part équipé d'un compas, permettant d'orienter le vecteur vitesse obtenu en fonction des coordonnées géographiques Est/Nord/Haut en temps réel, compensant l'éventuel mouvement de l'appareil.

Dans le cadre de notre étude, les appareils étant solidement fixés sur leurs cadres (figure III.2) et la déviation magnétique du compas due à la présence des structures ostréicoles métalliques étant très importante, nous choisissons de revenir en coordonnées instrument lors du post-traitement des données. Les deux appareils étant sensiblement orientés de la même façon, nous pouvons alors comparer leurs données.



*Figure III.2: A gauche : vue d'ensemble de l'ADV A1 (au premier plan, mesure sous la table) et de l'ADV A2 (au second plan, mesure dans l'allée). A droite : ADV A1 avec son bloc batterie supplémentaire au niveau du sol.*

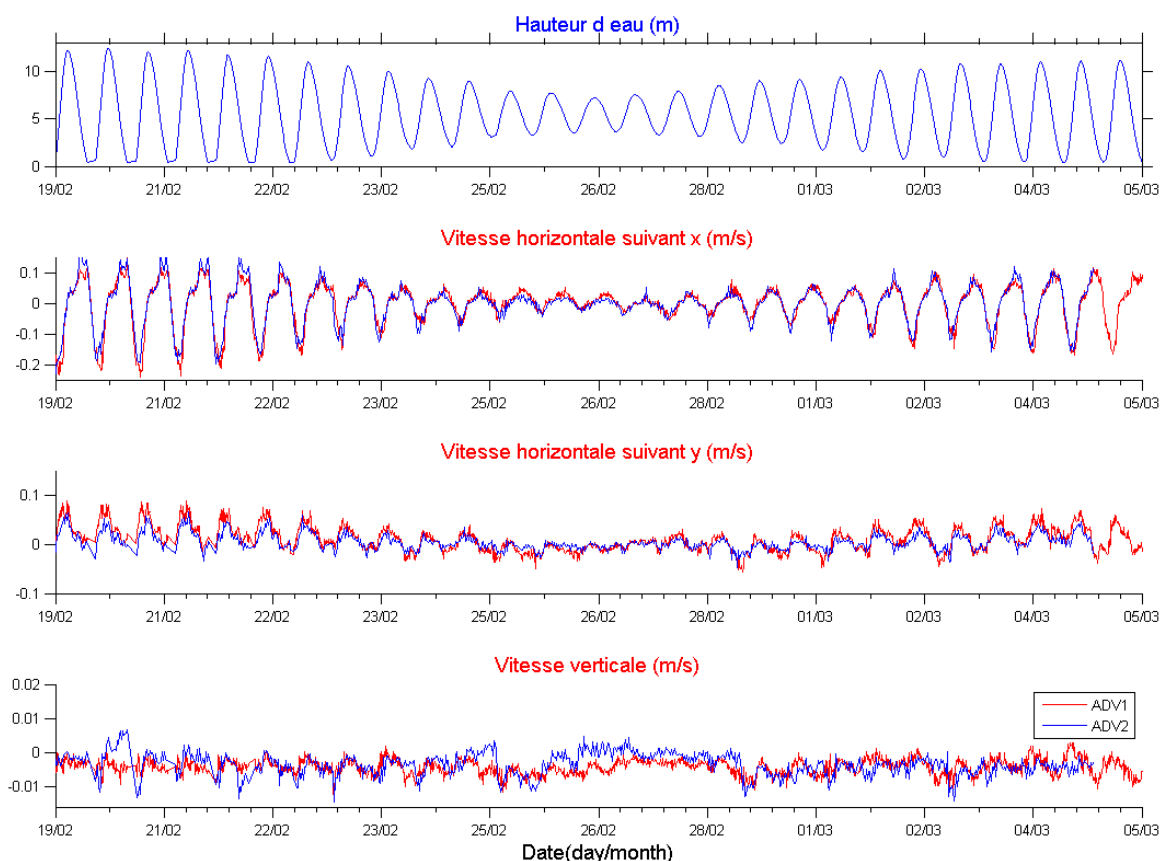
### Résultats :

La figure III.3 présente les variations des trois composantes de la vitesse au cours de plusieurs cycles de marée (15 jours) pour les deux ADV (ADV A1 sous table en rouge et ADV A2 dans l'allée en bleu).

La coordonnée nommée « x » dans le référentiel de l'instrument correspond à la direction dans laquelle sont alignées les tables (direction pratiquement Nord/Sud). Les valeurs positives de la première composante de vitesse horizontale correspondent à des courants se propageant du Sud vers le Nord, c'est-à-dire du haut vers le bas de l'estran (courants de jusant principalement).

La coordonnée nommée « y » dans le référentiel de l'instrument correspond à la direction orthogonale à l'alignement des tables (direction pratiquement Est/Ouest). Les valeurs positives de la seconde composante de vitesse horizontale correspondent donc à des courants se propageant de l'Ouest vers l'Est.

La composante verticale de la vitesse présente des intensités très faibles et n'autorise donc pas la comparaison entre les deux appareils.



*Figure III.3: Hauteurs d'eau, vitesses horizontales et vitesse verticale, ADV A1 (en rouge) et ADV A2 (en bleu).*

Nous voyons que l'ADV A1 placé sous la table présente des valeurs plus importantes pour la vitesse Nord-Sud, lors du flot et pour de forts coefficients de marée (vives-eaux). La même constatation (vitesses plus importantes lors du flot) est faite pour les vitesses Est-Ouest, avec toutefois une plus faible intensité.

L'ADV A2 placé dans l'allée enregistre quant à lui des valeurs plus importantes lors du jusant, toujours pour de forts coefficients de marée.

Les vitesses sont donc plus importantes sous la table lors du flot, et inversement, elles sont plus importantes dans l'allée lors du jusant. Des modifications d'orientation sont observées dans les deux cas.

Pour quantifier ces différences d'intensité et d'orientation, un zoom est réalisé sur des cycles de marée en vives-eaux (figure 8 de l'article, section II.1.1).

Résumé de l'article (section II.1.1, partie impact local sur les courants):

Les vitesses locales du courant de marée sont plus importantes sous la table que dans l'allée lors du flot (jusqu'à 50 % d'augmentation) et inversement, plus importantes dans l'allée que sous la table durant le jusant (jusqu'à 40 % d'augmentation). Le courant est aussi localement modifié en terme de direction : nous observons une réorientation des vecteurs vitesses dans l'axe de la table, jusqu'à 15° lors du flot et jusqu'à 20° lors du jusant.

Au niveau des contraintes de cisaillement près du fond induites par le courant, il n'y a pas de modification significative entre l'appareil placé sous la table et celui placé dans l'allée (les courants moyens sont modifiés mais pas les fluctuations de ces courants).

### III.1.2. Approche expérimentale

Pour compléter les mesures in-situ que nous venons de décrire, des campagnes expérimentales sont menées afin d'évaluer l'impact en champ proche des structures ostréicoles sur le courant.

L'intérêt des campagnes expérimentales vis à vis des mesures in-situ est de travailler dans un environnement "maîtrisé", c'est-à-dire que l'on peut isoler le forçage hydrodynamique que l'on veut étudier, en l'occurrence le courant dans notre étude, des autres paramètres environnementaux que sont les vagues, la météorologie, l'effet des organismes biologiques, ...

D'autre part, il est plus aisé de multiplier les points de mesure dans un bassin d'essais que sur un estran (accès aux appareils souvent dépendant des coefficients de marée) et donc d'évaluer l'homogénéité ou non de l'écoulement étudié.

Dans ce chapitre sont présentées les campagnes d'essais réalisées en 2008 et 2009 au bassin d'essais hydrodynamiques à surface libre de l'Ifremer, à Boulogne-sur-Mer (France). Dans un premier temps, le bassin ainsi que ses moyens de mesures sont décrits. Ensuite, après un rappel de la théorie de la similitude, nous présentons les maquettes de tables à huîtres que nous avons réalisées. Le protocole expérimental, c'est-à-dire les différentes configurations étudiées et le but de ces mesures, est explicité. Enfin, les résultats de ces différentes configurations sont présentés, analysés et discutés.

#### III.1.2.1. Le bassin de Boulogne-sur-Mer et ses moyens de mesures

##### III.1.2.1.a) Le bassin d'essais :

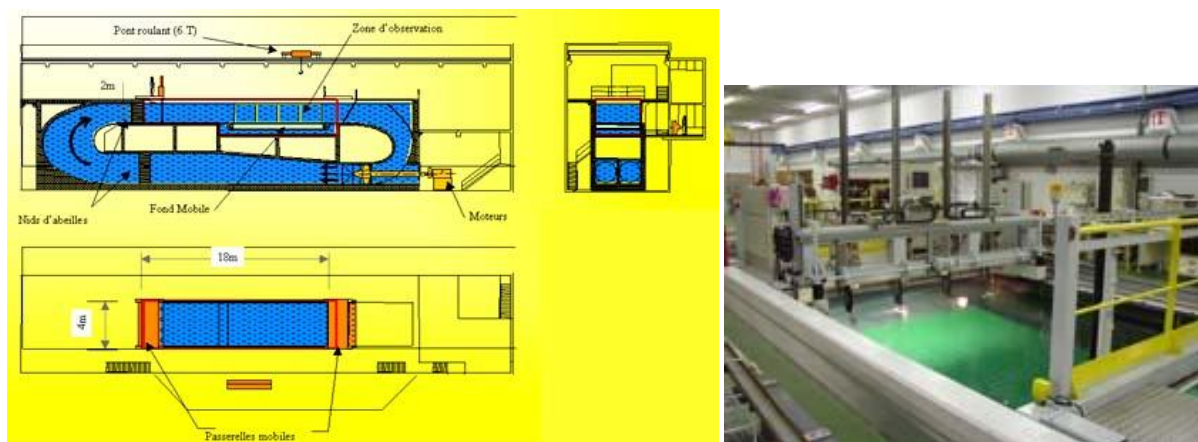


Figure III.4: Bassin d'essais hydrodynamiques de Boulogne-sur-Mer

Toute la modélisation expérimentale de l'impact local des tables à huîtres sur le courant a été réalisée dans le bassin d'essais Ifremer à Boulogne-sur-Mer (figure III.4). Ce bassin est une boucle verticale de circulation d'eau, possédant une surface libre et délivrant des caractéristiques hors norme : une zone utile de 18 mètres de long, 4 mètres de large et 2 mètres de profondeur ainsi qu'une vitesse d'écoulement variable allant de  $0.10 \text{ m.s}^{-1}$  à  $2 \text{ m.s}^{-1}$ . La turbulence naturelle (propre au bassin) y est inférieure à 10 % (5 % pour un courant de  $0.5 \text{ m.s}^{-1}$ ). Une partie vitrée de 8 mètres par 2 mètres située sur un des côtés de la veine permet une visualisation directe du comportement des maquettes et de la localisation du point ou de la surface de mesure.

#### III.1.2.1.b) Les moyens de mesures :

Nous avons utilisé deux techniques de mesure, non intrusives: un système de vélocimétrie laser Doppler (LDV : Laser Doppler Velocimetry) à deux composantes et un système de vélocimétrie par images de particules (PIV : Particle Image Velocimetry).

La PIV est une méthode optique permettant d'obtenir, à la différence de la LDV, un champ de vecteurs vitesses bidimensionnel dans un plan de l'écoulement étudié, et non pas une vitesse ponctuelle.

Le système de mesure est composé :

- d'un laser haute puissance et son système optique associé (laser à deux chambres Gemini PIV Nid-Yag 2 x 120 mJ à 15 Hz).
- D'une caméra CCD (Hi-sense,  $1280 \times 1024 \text{ pixels}^2$ , fréquence maximale 4 Hz, longueur focale de la lentille 60 mm avec un filtre de 3 nm de longueur d'onde).
- Du fluide étudié auquel des particules réfléchissantes ont été ajoutées. Dans notre cas, l'ensemencement du bassin a été réalisé avec des billes de verre recouvertes d'argent d'un diamètre moyen de  $15 \mu\text{m}$ .

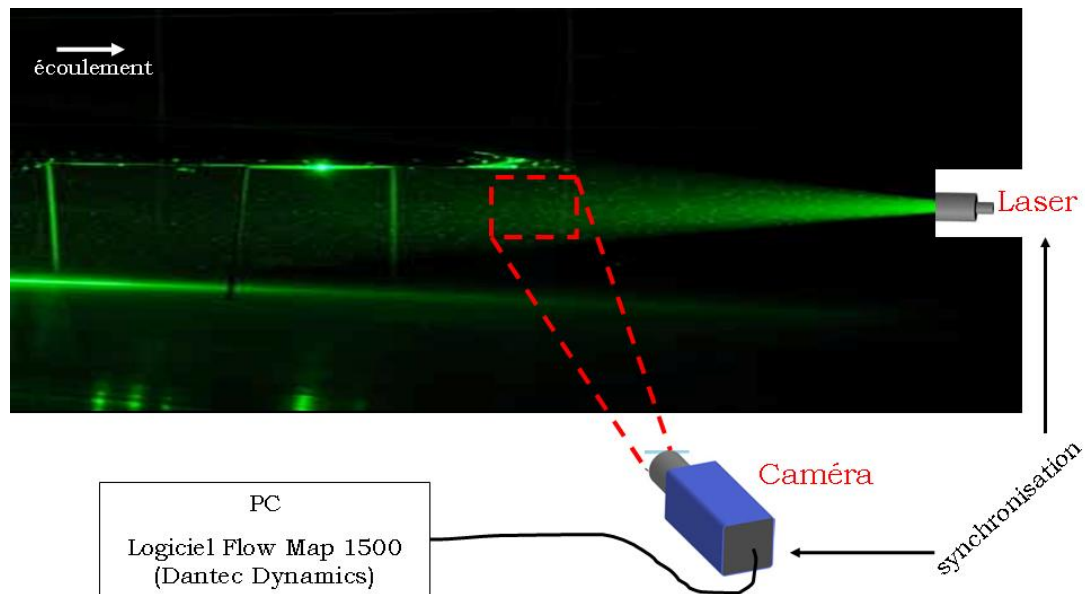


Figure III.5: principe de la technique PIV

Le principe de la mesure est simple : le laser agit comme un flash d'appareil photo. Les particules recouvertes d'argent, voyageant à la vitesse de l'écoulement, réfléchissent cette lumière. La lumière réfléchie est alors détectée par la caméra et les images du champ de particules sont enregistrées (figure III.5).

Dans notre cas, les plans laser réalisés par PIV sont des plans verticaux situés sur l'axe longitudinal médian. Le laser est donc placé en aval de notre maquette. Il émet deux impulsions lumineuses décalées d'un temps très court  $\Delta t$  égal à 3 ms. La caméra, placée derrière les fenêtres d'observation, prend deux photos synchronisées avec les impulsions du laser. Plusieurs séries de « double-images » sont ainsi enregistrées. Le facteur limitant de l'acquisition est la fréquence maximale de la caméra, soit 4 Hz (la fréquence du laser est de 15 Hz). Le temps séparant deux « double-images » est donc fixé à  $t = 250$  ms.

Le post-traitement des images, dont la taille est 284 mm x 227 mm (soit 1 pixel = 0.222 mm), est effectué par intercorrélation d'images à l'aide du logiciel *Flow Manager* de *Dantec Dynamics*. Les deux images obtenues par la caméra sont découpées en petites cellules de 16 x 16 pixels, appelées zones d'interrogation. Afin de traiter les particules qui sortent de la zone d'interrogation étudiée, une zone de recouvrement (en horizontal et en vertical) de 25 % est définie. Dans chaque zone d'interrogation, on va chercher les positions des particules et ainsi en déduire leur déplacement moyen  $\delta z$  entre les deux images. On obtient ainsi la vitesse locale de l'écoulement par la relation :



$$u = S \frac{\delta z}{\Delta t}$$

Où  $S$  est le facteur d'échelle de l'image et  $u$  le vecteur vitesse dans le plan du faisceau laser.

Un critère de qualité est défini sur les composantes de chaque vecteur vitesse obtenu afin d'enlever les valeurs aberrantes. Enfin, un filtre est appliqué, qui permet de substituer chaque vecteur vitesse par la moyenne de ses plus proches voisins. Il faut généralement 80 « doubles-images » pour obtenir un champ moyen de vitesse.

La LDV (aussi appelée LDA pour Laser Doppler Anemometry) est aussi une méthode de mesure optique permettant d'obtenir la valeur de la vitesse (ainsi que ses fluctuations) de l'écoulement en un point.

La technique consiste à se placer en un point de l'écoulement et à éclairer cette zone à l'aide de deux faisceaux de même longueur d'onde. Ces deux faisceaux sont issus de la même source laser (figure III.6), précédemment décrite, et sont focalisés, par le biais d'une lentille, au point voulu que l'on appelle « volume de mesure ». Un réseau de franges d'interférence est ainsi créé (faisceau de même longueur d'onde). Dès qu'une particule traverse le volume de mesure et son réseau de franges, elle émet de la lumière à une certaine fréquence (à chaque passage sur une frange lumineuse, cf figure III.7).

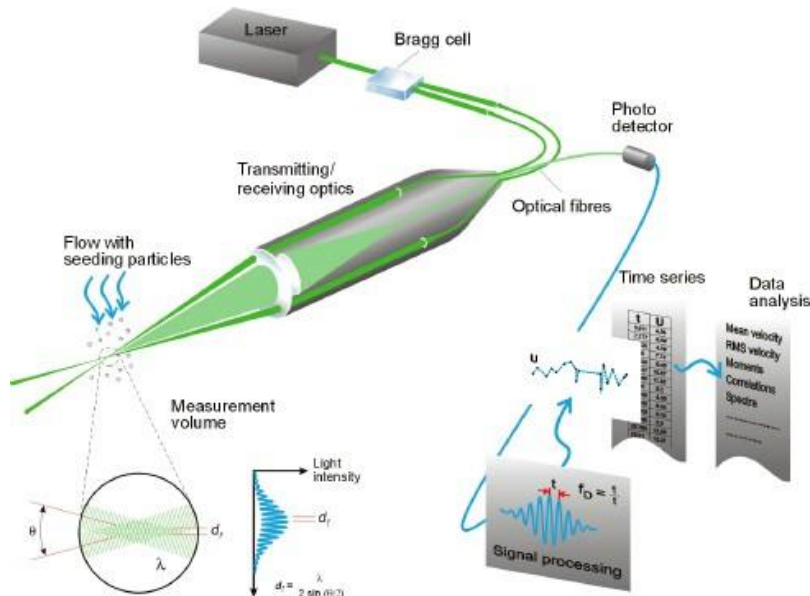


Figure III.6: principe de la technique LDV (source : Dantec Dynamics)

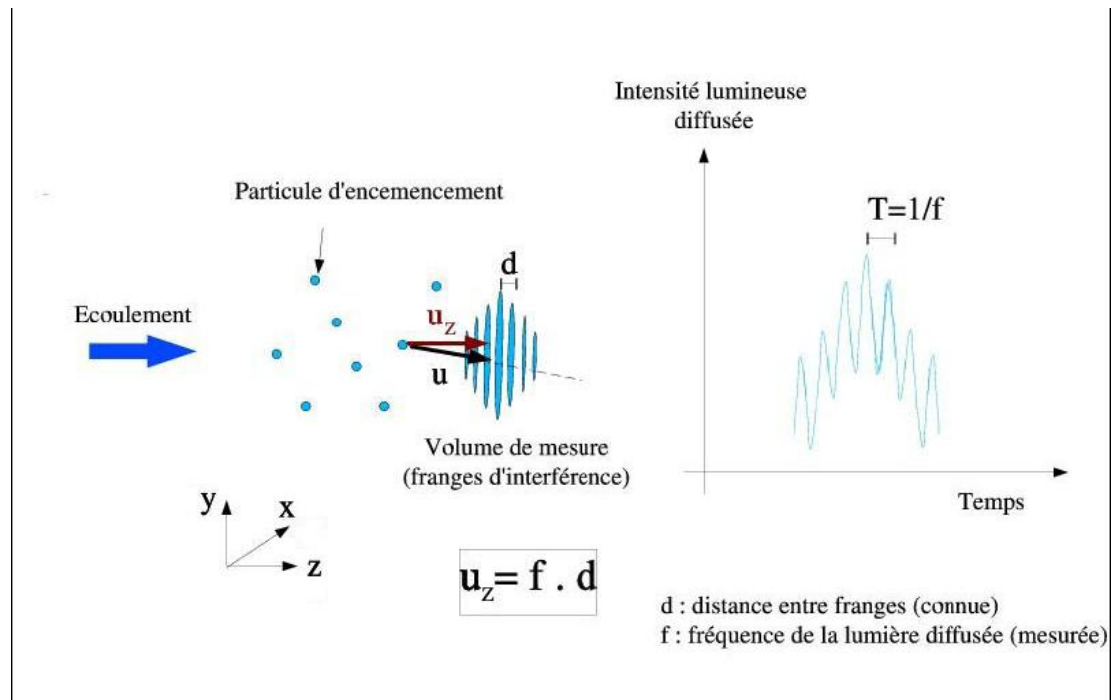
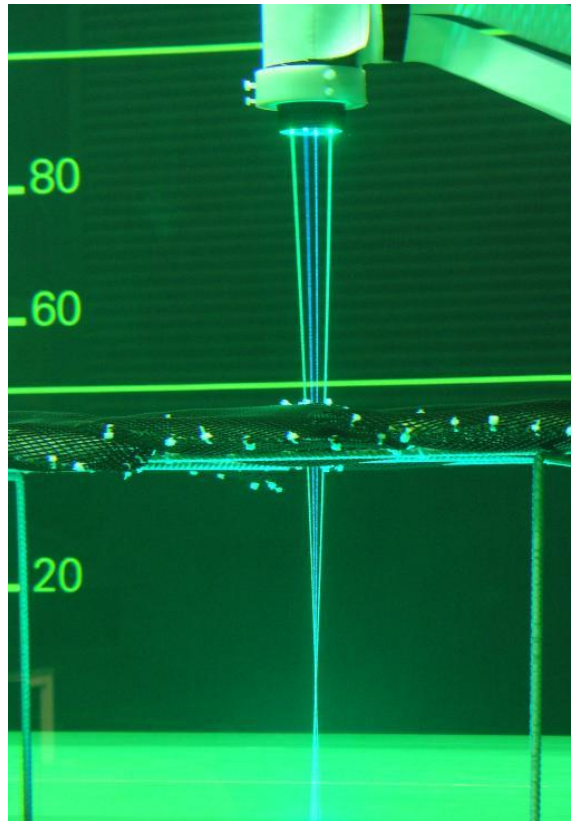


Figure III.7: fonctionnement de la LDV (extrait de (Pichot, 2007))

Connaissant la distance  $d$  entre deux franges, il est aisé de calculer la composante de la vitesse de la particule par la formule :

$$u = fd \quad (48)$$

La LDV disponible au bassin d'essais Ifremer de Boulogne-sur-Mer est une LDV à deux composantes : la source laser est décomposée en deux rayons ayant des longueurs d'onde différentes (514.5 nm et 488 nm) permettant ainsi une mesure bidimensionnelle de la vitesse de l'écoulement. Au total, quatre faisceaux (deux verts et deux bleus, cf figure III.8) se croisent donc dans le volume de mesure, formant ainsi deux réseaux perpendiculaires de franges d'interférence. Les dimensions du volume de mesure sont : 0.1 mm dans la direction principale de l'écoulement et 2.5 mm dans la direction transverse. Les particules d'ensemencement sont les mêmes que celles utilisées pour la technique PIV.



*Figure III.8: Système LDV mesurant sous une table à huîtres*

Notons que la mesure LDV ne se fait pas à une fréquence fixe, le temps entre deux mesures étant en effet dépendant du passage d'une particule dans le réseau de franges du volume de mesure.

#### III.1.2.2. Les maquettes de table à huîtres

Avant de commencer la construction des maquettes, il est important de définir leurs dimensions « optimales » afin de représenter au mieux l'écoulement au niveau d'une table à huître « réelle ». Il faut garder à l'esprit que plus l'échelle à laquelle nous travaillons dans le bassin est grande (c'est-à-dire proche de 1), mieux les phénomènes physiques sont représentés ; mais il y a aussi la contrainte des dimensions du bassin : il faut que la maquette tienne dans ce bassin et qu'elle soit suffisamment éloignée des parois pour s'affranchir des effets de bords.

Pour respecter les critères d'échelles entre le modèle et la réalité, il faut recourir à la théorie de la similitude. Dans notre cas, il s'agit d'une similitude géométrique : le rapport de toutes les longueurs correspondantes du modèle expérimental et de la structure « réelle » doit être constant. Nous allons décrire cette théorie de la

similitude dans le cas des équations de Navier-Stokes en considérant notre fluide comme incompressible. Cela nous permettra de dimensionner notre maquette et de définir notre vitesse en amont de la structure.

### III.1.2.2.a) Théorie de la similitude

Les équations de Navier-Stokes adimensionnalisées sont obtenues en posant :

$$\begin{cases} \mathbf{x} = L \mathbf{x}^* \\ \mathbf{u} = U \mathbf{u}^* \\ \mathbf{p} = P \mathbf{p}^* \\ \mathbf{t} = T \mathbf{t}^* \\ \mathbf{g} = g_0 \mathbf{g}^* \end{cases} \quad (49)$$

où  $L$  est la longueur de référence (en m, ici la longueur d'une poche (0.5 m) est prise comme longueur de référence),  $U$  la vitesse de référence (en m.s<sup>-1</sup>),  $P$  la pression de référence (en Pa),  $T$  le temps de référence (en s) et  $g_0$  l'accélération de la pesanteur ( $g_0 = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$ ). Les quantités avec des astérisques représentent les quantités adimensionnalisées.

Les opérateurs se réécrivent :

$$\begin{cases} \nabla = \frac{1}{L} \nabla^* \\ \nabla \cdot = \frac{1}{L} \nabla \cdot^* \\ \Delta = \frac{1}{L^2} \Delta^* \end{cases} \quad (50)$$

D'où les équations de Navier-Stokes incompressibles adimensionnalisées :

$$\begin{cases} St \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial t^*} + \mathbf{u}^* \nabla \mathbf{u}^* + Eu \nabla p^* - \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{u}^* = \frac{1}{Fr} \mathbf{g}^* \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (51)$$

Avec les nombres sans dimension suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} St = \frac{L}{UT} \text{ le nombre de Strouhal} \\ Eu = \frac{P}{\rho U^2} \text{ le nombre d'Euler} \\ Re = \frac{UL}{\nu} \text{ le nombre de Reynolds} \\ Fr = \frac{U^2}{g_0 L} \text{ le nombre de Froude} \end{array} \right.$$

où  $\nu$  est la viscosité cinématique du fluide et  $\rho$  sa masse volumique.

On choisit  $T$  tel que :  $UT = L$

Et  $P$  comme étant la pression dynamique :  $P = U^2 \rho$

Ce qui conduit à  $St = 1$  et  $Eu = 1$ .

L'équation (51) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial t^*} + \mathbf{u}^* \cdot \nabla \mathbf{u}^* + \nabla p^* - \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{u}^* = \frac{1}{Fr} \mathbf{g}^* \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{array} \right. \quad (52)$$

La première équation est l'équation de bilan de quantité de mouvement et la seconde est l'équation de continuité, traduisant ici l'incompressibilité du fluide.

La similitude entre la maquette et la structure « réelle » est garantie par l'égalité entre les deux échelles de tous les paramètres sans dimension obtenus lors de l'analyse dimensionnelle. Dans notre cas, il faudrait avoir simultanément l'égalité des nombres de Froude et de Reynolds en bassin et *in-situ*. Or, on ne peut satisfaire à la fois la similitude de Froude et celle de Reynolds (sauf si on travaille à l'échelle 1 et ce n'est pas possible dans notre cas).

La similitude de Froude exprime la conservation du rapport entre les forces d'inertie et les forces de pesanteur, et la similitude de Reynolds la conservation du rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité.

Dans la pratique, c'est la similitude la plus importante qu'il faut respecter.

Dans notre cas, c'est-à-dire en écoulement turbulent à surface libre et où les forces de viscosité peuvent être négligées, on peut ne satisfaire que la similitude de

Froude. En effet, notre modèle expérimental et la structure « réelle » restent alors dans le même régime d'écoulement ( $Re_{réel} = 8 \cdot 10^5$  et  $Re_{maquette} = 2.5 \cdot 10^5$ ).

Les maquettes de tables à huîtres sont donc réalisées en respectant la similitude de Froude.

#### III.1.2.2.b) Réalisation des maquettes

Sur le terrain, les dimensions ainsi que le positionnement des tables à huîtres sont réglementés (article 813 de 1975) : largeur totale et hauteur totale maximales de 1.20 m, pas plus de 4 rangées par bande de terrain de 12 m de large, ..

Les dimensions qui prévalent en Baie du Mont Saint-Michel (cf figure III.9) et sur lesquelles nous nous sommes basés pour réaliser les maquettes sont :

- Longueur des sacs (= largeur maximale de la table) : 1 m
- Largeur d'un sac : 0.50 m
- Epaisseur d'un sac : 0.12 m
- Hauteur des tables : 0.70 m (sur le terrain, entre 0.50 et 0.90 m selon degré d'envasement)
- Diamètre des fers servant à la fabrication des tables : 0.016 m
- Longueur des tables : 100 m



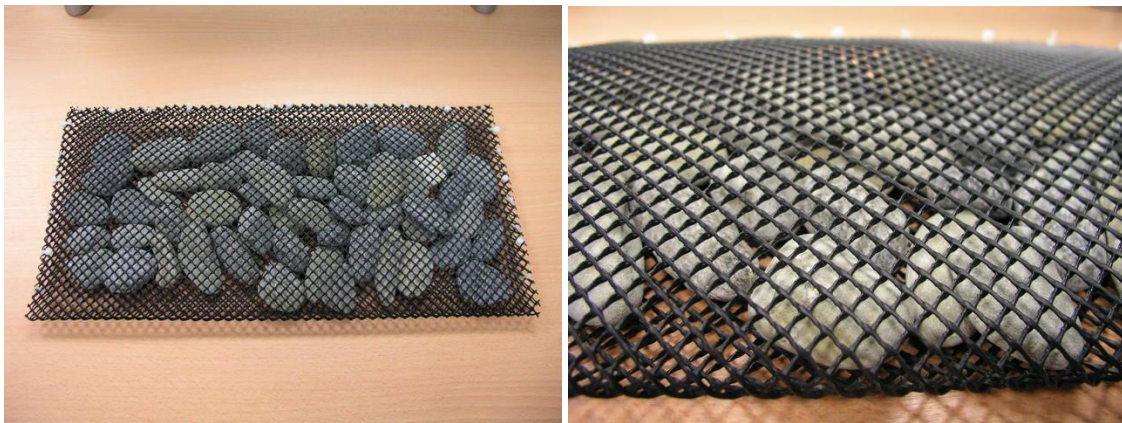
*Figure III.9: tables ostréicoles en Baie du Mont Saint-Michel*



Afin d'obtenir une représentation satisfaisante des interactions entre la table et le courant, tout en évitant les effets de bord du bassin, nous avons choisi de réaliser notre maquette à l'échelle  $\frac{1}{2}$ .

La seule dimension qui ne pouvait être représentée à cette échelle (impossibilité physique de la mettre dans le bassin) était la longueur de la table : 100 m à l'échelle  $\frac{1}{2}$ , soit 50 m. Afin d'étudier malgré tout l'effet de la longueur de la table, nous avons réalisé 2 tables de 3.60 m de longueur. Nous avons ainsi la possibilité de comparer une table de 3.60 m de long avec une table de 7.20 m de long (2 x 3.60 m). Ces dimensions nous permettaient d'autre part d'envisager de multiples orientations de la table vis-à-vis du courant.

Des dessins techniques de la table ont ainsi été réalisés (cf annexe). A partir de ces dessins, les tables ont été construites à l'aide de fer à béton de 8 mm de diamètre et ont ensuite été métallisées pour résister à la corrosion due aux immersions répétées dans le bassin.



*Figure III.10: poche à huîtres remplie de galets*

Des sacs à huîtres (appelés « poches à huîtres ») ont été réalisés à l'aide de vraies poches à huîtres, tout en respectant le facteur d'échelle de  $\frac{1}{2}$  : taille des alvéoles de 7 mm (contre 14 mm sur le terrain), longueur de 0.50 m, largeur de 0.25 m (figure III.10). Ces poches ont été remplies à l'aide de galets possédant une taille représentative d'huîtres à maturité ; il n'était en effet pas envisageable d'introduire des huîtres dans le bassin, leurs débris étant source de dysfonctionnement des turbines.

Ces poches, au nombre de 32, ont été fixées sur les 2 tables de 3.60 m (figure III.11). Des trous cylindriques ont été percés au centre de 3 de ces poches afin de permettre le passage du laser (LDV) et ainsi de réaliser des mesures de vitesse sous la table.



Figure III.11: maquette de tables

### III.1.2.3. Le protocole expérimental

#### III.1.2.3.a) Les différentes configurations

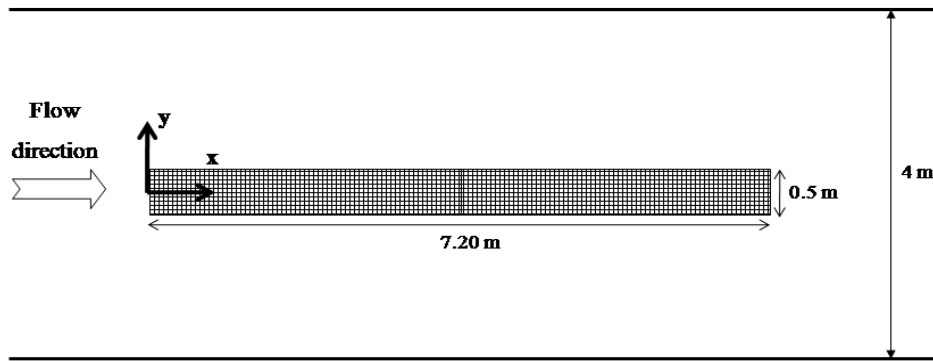
Trois configurations différentes ont été étudiées lors des différentes campagnes d'essais (figure III.12) afin d'évaluer l'influence de l'incidence de la table vis-à-vis du courant principal ainsi que l'influence de la succession de plusieurs tables:

- La configuration A : la direction de la table (table de 3.60 m ou de 7.20 m) est colinéaire à la direction de l'écoulement principal.  
33 profils verticaux et 9 profils horizontaux sont réalisés par LDV, chaque profil étant constitué de 17 points de mesure. En chacun de ces points de mesure, les composantes longitudinale ( $u$ ) et transversale ( $v$ ) de la vitesse, ainsi que leurs fluctuations, sont simultanément mesurées pendant 100 secondes (profils  $uv$ ). Des cartographies verticales du champ de vitesse le long de la table sont aussi réalisées par PIV (figure .. et pour plus de détails, voir section IV.1.2.4.a-, article « *Experimental study of the near-field impact of an oyster table on the flow* »).

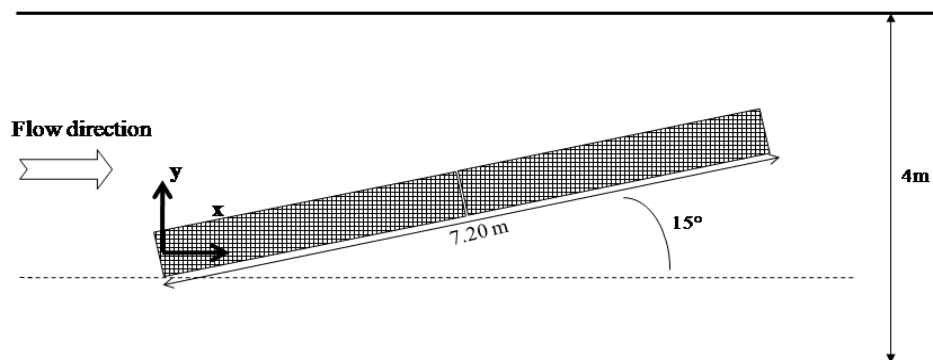
4 profils verticaux mesurant simultanément les composantes longitudinale ( $u$ ) et verticale ( $w$ ) de la vitesse ainsi que leurs fluctuations sont également réalisés sur le plan médian le long de la table (profils  $uw$ ). L'acquisition de ces mesures est suffisamment longue (420 secondes) pour en déduire la contrainte de cisaillement au point étudié (pour plus de détails, voir section III.1.2.4.b-, article « *Boundary layer development and shear stresses measurements around oyster tables* »).



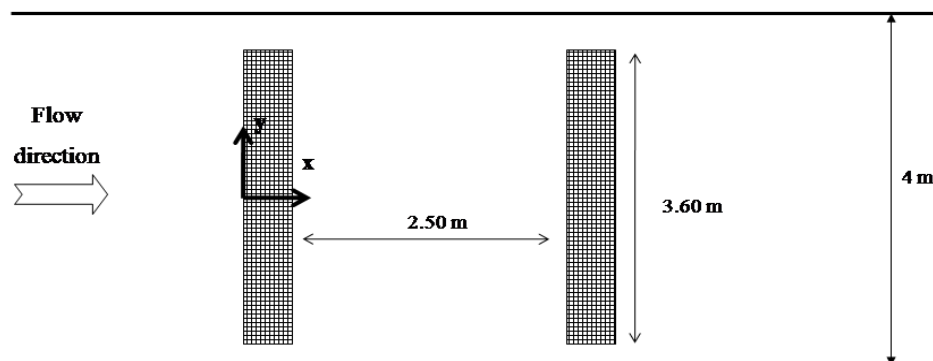
- La configuration B : l'angle entre la direction de la table (de 7.20 m) et la direction de l'écoulement principal est égal à  $15^\circ$ .  
Dans cette configuration, 66 profils uv et 5 profils uw sont réalisés.
- La configuration C : la direction des tables (2 tables de 3.60 m) est perpendiculaire à la direction de l'écoulement principal.  
Dans cette configuration, 15 profils uv et 6 profils uw sont réalisés.



CONFIGURATION A



CONFIGURATION B



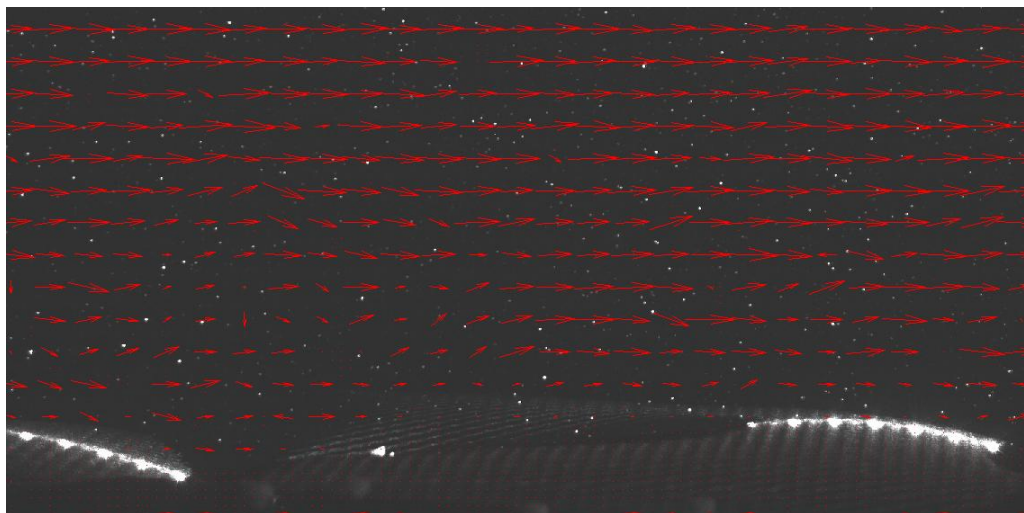
CONFIGURATION C

Figure III.12: vue de dessus des différentes configurations utilisées dans le bassin d'essais

Les mesures in-situ (Kervella et al., 2010c) ont montré que la vitesse maximale du courant rencontrée dans notre zone intertidale contenant des parcs à huîtres était d'environ  $0.4 \text{ m.s}^{-1}$  à 5 cm du sol (mesures ADV). Pour reproduire cette vitesse dans la veine d'essais, tout en respectant la similitude de Froude, une vitesse de  $0.28 \text{ m.s}^{-1}$  à 2.5 cm du sol a été générée, ce qui correspond à une vitesse dans la colonne d'eau (en dehors de la couche limite de fond) égale à  $0.5 \text{ m.s}^{-1}$  (vitesse infinie amont). Avec cette vitesse, le nombre de Reynolds est égal à  $2.5 \cdot 10^5$ .

Les interactions entre la table et l'écoulement ont également été étudiées dans le cadre d'une vitesse infinie amont de  $0.3 \text{ m.s}^{-1}$  pour la configuration A. Les effets de la vitesse sur le développement des couches limites autour de la table sont ainsi analysés.

Pour toutes ces configurations, les mesures sont effectuées dans une hauteur d'eau de 2 m (soit une hauteur « réelle » de 4 m), représentative d'une hauteur intermédiaire rencontrée sur le terrain.



*Figure III.13: photographie d'une poche à huître dans le bassin avec superposition du champ de vecteurs vitesses obtenu par mesure PIV.*

### III.1.2.3.b) Que veut-on mesurer ?

Le but de ces expériences est de comprendre et de quantifier les phénomènes hydrodynamiques ayant lieu autour d'une ou plusieurs tables à huîtres en présence de courant (figure III.13). Gardons à l'esprit que notre finalité est aussi de comprendre la dynamique sédimentaire découlant de ces phénomènes

hydrodynamiques. Une attention toute particulière sera donc prêtée aux phénomènes ayant lieu sous la table, notamment au niveau du fond.

Cette zone est en effet le siège d'importants mouvements de sédiments : dépôt, érosion, remise en suspension, etc... Des mesures de vitesses et de contraintes de cisaillement sont donc réalisées près du fond.

Durant ces campagnes expérimentales, les développements de couches limites (zones de réduction de vitesse) autour de la table et au niveau du sol, les zones où des phénomènes de floculation ou de fragmentation peuvent avoir lieu, ainsi que les modifications de contraintes au niveau du fond ou sur toute la colonne d'eau, sont étudiés. Une nouvelle pièce a ainsi été réalisée afin d'orienter différemment les faisceaux lasers de la LDV (cf annexe).

A travers ces différentes configurations, l'effet de l'orientation de la table vis-à-vis du courant incident est donc étudié. Notons que sur les estrans, les tables sont généralement alignées avec la direction des courants principaux. Mais cela n'est pas toujours le cas, et l'on observe même des concessions où les tables sont perpendiculaires à la direction du courant principal (configuration C). Parfois, au sein d'une même concession, les tables possèdent plusieurs orientations (notamment à Marennes-Oléron).

L'effet de la longueur de la table et de l'intensité du courant amont est également étudié dans la configuration A.

L'effet de l'interaction entre deux tables est étudié dans la configuration C.

Dans de futures études, l'effet de la hauteur d'eau pourra être étudié grâce à un faux-plafond réglable (plaque servant de plancher que l'on peut disposer à différentes hauteurs dans la colonne d'eau) après sa caractérisation dans le bassin d'essais.

#### III.1.2.4. Les résultats expérimentaux

##### III.1.2.4.a) Table(s) colinéaire(s) au courant (configuration A)

Les résultats acquis dans cette configuration sont présentés dans l'article :

« Experimental study of the near-field impact of an oyster table on the flow »  
(European Journal of Mechanics / B Fluids 29 (2010), pp. 32-42).

Résumé de l'article:

Cette étude traite de l'impact local d'une table à huître sur le courant par le biais de mesures LDV et PIV en bassin d'essais. La structure est placée colinéairement à la direction de l'écoulement principal dont la vitesse infinie est maintenue constante.

Les résultats révèlent une asymétrie au niveau du développement des couches limites autour de la table et mettent en évidence des zones de fortes décélérations sous la table. Il en résulte donc des modifications significatives des conditions du transport sédimentaire sous la structure, à proximité du fond, avec création de zones préférentielles de dépôt.

Les résultats soulignent aussi la création d'une importante zone de fragmentation sous les poches à huîtres, où les particules en suspension ne peuvent excéder une certaine taille définie par la micro-échelle de Kolmogorov.

Des calculs de longueur de rugosité et de contraintes de cisaillement sont effectués autour de la table et près du fond et révèlent l'importance des structures quant à la dissipation de l'énergie du courant.

L'effet de la longueur de la table est aussi examiné dans cette étude.



Contents lists available at ScienceDirect

European Journal of Mechanics B/Fluids

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ejmflu](http://www.elsevier.com/locate/ejmflu)

## Experimental study of the near-field impact of an oyster table on the flow

Youen Kervella<sup>a,c,\*</sup>, Grégory Germain<sup>b</sup>, Benoît Gaurier<sup>b</sup>, Jean-Valéry Facq<sup>b</sup>,  
Florence Cayocca<sup>a</sup>, Patrick Lesueur<sup>c</sup>

<sup>a</sup> IFREMER, DYNECO/PHYSED, Centre de Brest, BP 70, 29280 Plouzané, France

<sup>b</sup> IFREMER, ERT/HO, Centre de Boulogne, 150 quai Gambetta, BP 699, 62321 Boulogne-sur-Mer, France

<sup>c</sup> Laboratoire M2C Université de Caen-Basse Normandie, CNRS/INSU UMR 6143, 2-4 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 28 January 2009

Received in revised form

9 July 2009

Accepted 7 September 2009

Available online xxx

#### Keywords:

Oyster table

Flume

Laser Doppler Velocimetry

Particle Image Velocimetry

Boundary layer

Roughness length

Sediment dynamics

### ABSTRACT

Oyster farming structures are artificial obstacles which disturb tidal flow and wave propagation. These effects can induce modifications of erosion and sedimentation patterns, turbidity changes, local silting up and can be threatening for the shellfish farming itself. The understanding of the impact of these structures in terms of hydrodynamics and sediment dynamics in the far-field, i.e. at the scale of a bay, is a very challenging task.

In order to investigate the far-field impact, it is very important to understand in the first place all the changes which occur at a smaller scale, i.e. at the scale of a single table for a farm consisting of oyster tables made of metallic wire structures on which porous bags of oysters are laid. This work is carried out through the idealized representation of the in-situ flow in a free surface flume tank. The flow characteristics around the overall structure are determined from velocity measurements obtained by laser velocimetry. The results highlight an asymmetric development of the boundary layers which suggest the existence of preferential areas for silting up and suspended matter fragmentation under the table.

© 2009 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

### 1. Introduction

Oyster farming took off in France in the middle of the nineteenth century with the first thoughts about oyster exploitation and preservation methods by the pioneers De Bon, Coste & Michelet ([www.ostrea.com](http://www.ostrea.com)).

Nowadays, four different farming techniques are used by the French oyster farmers: (1) "on the ground farming", where oysters are simply spread on the tidal flat and picked up during low tide; (2) "deep water farming", where oysters are spread on the ground too, and harvested by a dredge; (3) "suspended farming", where oysters are suspended on ropes, particularly used in the southern France, and (4) the most widely used technique, "elevated farming", which is the most adapted to coasts open to waves and currents. In this case, farms whose dimension can be several squared kilometres, consist of a set of rows of iron wire "tables" which are 100 m long by 1 m wide (Fig. 1). Oysters are locked up in meshed plastic bags attached to these tables.

The latter farming technique leads to better quality oysters and increases the productive capacity thanks to reduced losses. However, shortly after the farm installation, an increase in the bed level by sediment deposits has been observed around the structures. This effect could be inherent in this elevated farming technique where oyster tables could induce a decrease in velocity and a deviation of the tidal flow, a local "agitation" weakening and a flow canalization [22]. Sediment deposits under the oyster tables could therefore be protected from erosion, which would explain the observed increase in bed level under the tables. These phenomena are directly or indirectly responsible for mortality events [14,17]. These observations have therefore prevailed to a massive oyster farms reorganization since the early seventies in the Mont Saint-Michel Bay [1].

Numerical studies were carried out in order to estimate the morpho-sedimentary effects of oyster or mussel posts [19,21] but were never really validated.

Cayocca [4] introduced the effects of mussel farms on flow circulation and sediment dynamics into a numerical model by increasing the hydraulic roughness used for velocity computations at the location of mussels structures. This study opens a way of modelling mussel or oyster structures implantation but needs to be validated and particularly, the local hydrodynamic processes need to be more accurately described.

\* Corresponding author. IFREMER, DYNECO/PHYSED, Centre de Brest, BP 70, 29280 Plouzané, France. Tel.: +33 2 98 22 47 60.  
E-mail address: [Youen.Kervella@ifremer.fr](mailto:Youen.Kervella@ifremer.fr) (Y. Kervella).





Fig. 1. Oyster farm in the Mont Saint-Michel Bay.

Some studies were carried out in flume tanks: Bouma [3] studied spatial flow and sedimentation patterns within patches of epibenthic structures; Plew [16] used vertical rough cylinders in a flume tank in order to investigate the impact of long-lines mussel farms on the flow. Other studies were also carried out for biological motivations: Lundquist and Pilditch [12] performed experiments in a flume tank that mimics water movement near the seafloor to give an indication of flow speeds that result in transport of bivalves. The impact of oyster tables on the wave pattern and on the bottom shear stress was estimated by Guizien [8] with a few restrictions: tables were simply modelled by horizontal solid plates, for normal incidence only and without currents. To our knowledge, no other experimental study has been carried out on the interaction between oyster tables and their hydrodynamic and sedimentological environment.

Since the beginning of the eighties, measurement devices have greatly benefited from the emergence of high performance

optic and acoustic sensors. These new devices allow high frequency field measurements of waves, currents and turbidity [4–7,11,28,20,2,26,24,]. Nevertheless, apart from some recent field studies [9,10], no deployment focuses on the impact of oyster farming on hydrodynamics.

The present paper describes the experimental study undertaken to determine the impact of an oyster table on the flow, in order to understand fluid/structure interaction effects, particularly in terms of sediment dynamics. Flume tank experiments considered here allow a perfect control of the environmental parameters in order to facilitate the physical understanding of the flow around the overall structure. A specific oyster table model was developed to allow to collect data on the flow by Laser Doppler Velocimetry (LDV) and Particle Image Velocimetry (PIV) techniques.

First, in the results sections, velocity maps are produced around the table which underline boundary layers developments and areas of flow decrease in speed. Then, in the discussion section, the

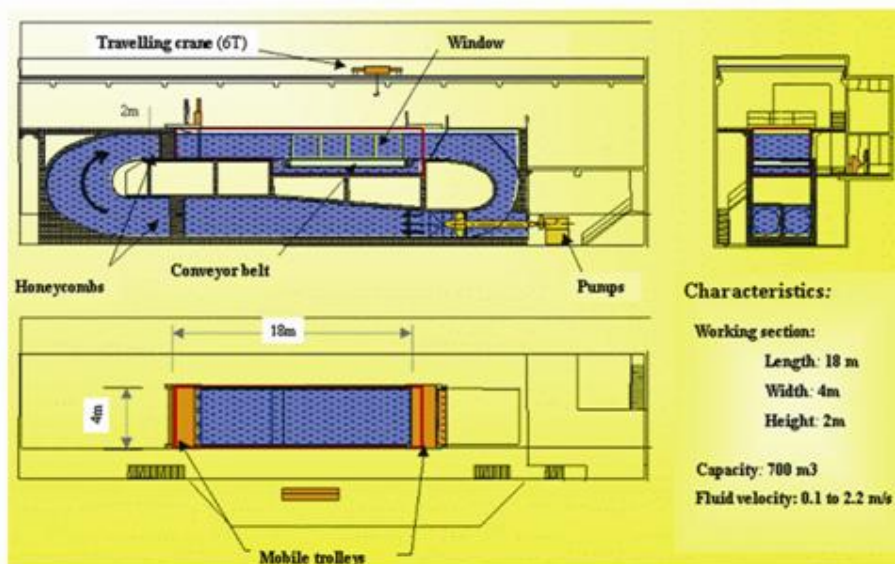


Fig. 2. IFREMER facility.

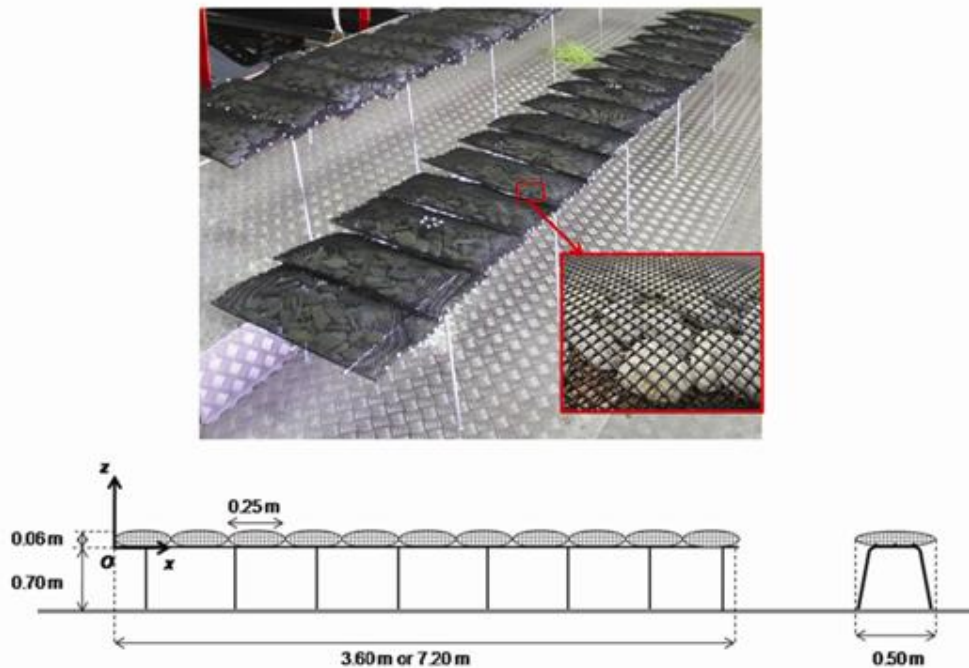


Fig. 3. Oyster table model.

impact of an oyster table on hydrodynamics and on sediment dynamics are both investigated: velocity profiles are used in order to determine table-induced and bottom-induced shear stresses; maps of turbulent kinetic energy and Kolmogorov microscale are examined in order to localize areas of flocculation or fragmentation. These data will be used to validate numerical studies which will be described in a future paper.

## 2. Experimental device

### 2.1. Experimental setup

The experimental study took place in the IFREMER (French Research Institute for Exploitation of Sea) free surface flume tank in Boulogne-sur-Mer, France. The flume tank (Fig. 2) provides an homogeneous current in the range  $[0.15; 2 \text{ m s}^{-1}]$ . The tank

working section is 18 m long, 4 m wide and 2 m deep, with transparent  $8 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  side windows for direct observation.

In the field, an oyster table is typically 100 m long, 1 m wide and 0.7 m high; a good understanding of the sharp current-table interactions drives the choice of a 1/2 scaled model according to Froude similarity. Representing the whole table lengthwise would have required a much greater scale. However, effects of the table length on the flow pattern were investigated through the use of 2 experimental tables of 3.6 m and 7.2 m long, these dimensions were chosen so as to allow future oblique orientations in the tank. The oyster table model was made of 8 mm diameter galvanized iron rod. The oyster bags were manufactured with the same plastic nets as used in the field, but with a 7 mm meshes (half as large as in the field), while the size ratio between reality and experiments was preserved. Photos and dimensions of the model are given in Fig. 3. The bags were filled with real pebbles used to simulate oysters. Cylindrical holes were cut out in the middle of few bags in order to

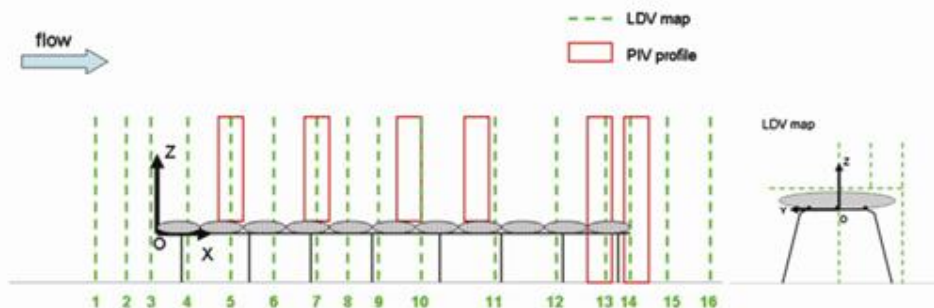


Fig. 4. Geometry of the 7.20 m table model and locations of the measurement profiles.



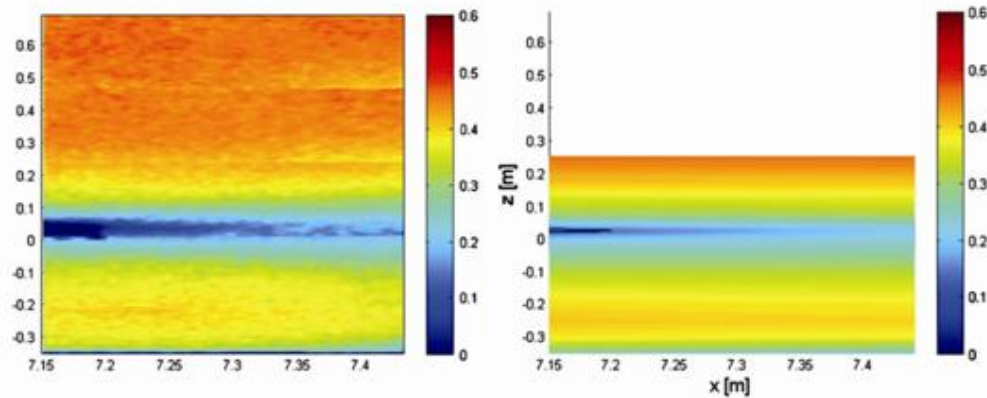


Fig. 5. Longitudinal velocities ( $\text{m.s}^{-1}$ ) at the trailing edge of the 7.2 m table (Oxz plane) obtained by PIV (on the left) and LDV (on the right, after interpolation between profiles at  $x = 6.65$  m and at  $x = 7.65$  m).

allow laser measurements under the table. Note that oyster net structures are not able to fluctuate laterally.

According to in-situ measurements [9], maximum velocities recorded in a macro-tidal environment within oysters structures are of the order of  $0.4 \text{ m.s}^{-1}$  at 5 cm from the bottom. In order to reproduce this magnitude in the flume, water flow with a scaled velocity of  $0.28 \text{ m.s}^{-1}$  was generated at a 2.5 cm level from the bottom by the propellers, which means a velocity of  $0.5 \text{ m.s}^{-1}$  in the whole water column. In both geometrical cases, i.e. with a 3.6 m in length table or with a 7.2 m in length table, the flow is turbulent. Reynolds numbers respectively equal to  $1.8 \times 10^6$  and  $3.6 \times 10^6$ . The 2 m water depth used for these tests corresponds to an intermediate value encounter in the field within oyster farms.

For a clear localisation of the velocity fields that will be described in various planes, a global frame of reference (O,x,y,z) is chosen. The origin is set at the middle of the upstream table side, just under the first bag (Fig. 4). Ox is the in-line axis, Oy the transverse axis and Oz the vertical axis.

## 2.2. Instrumentation

Two non-intrusive measurement devices are used to characterize the flow in the vicinity of the table:

- a two-component Laser Doppler Velocimeter for local measurements,

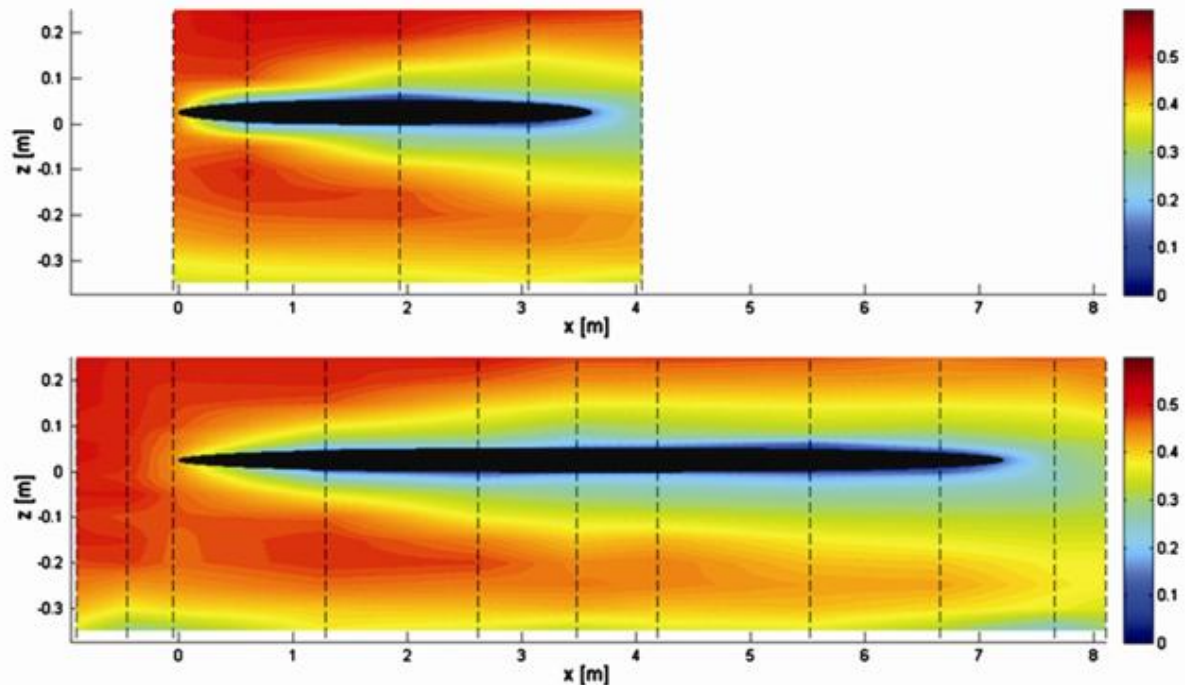


Fig. 6. Longitudinal velocities ( $U_x$ ,  $\text{m.s}^{-1}$ ) on the median plane, for a 7.20 m table. Dotted lines represent LDV measurement locations.



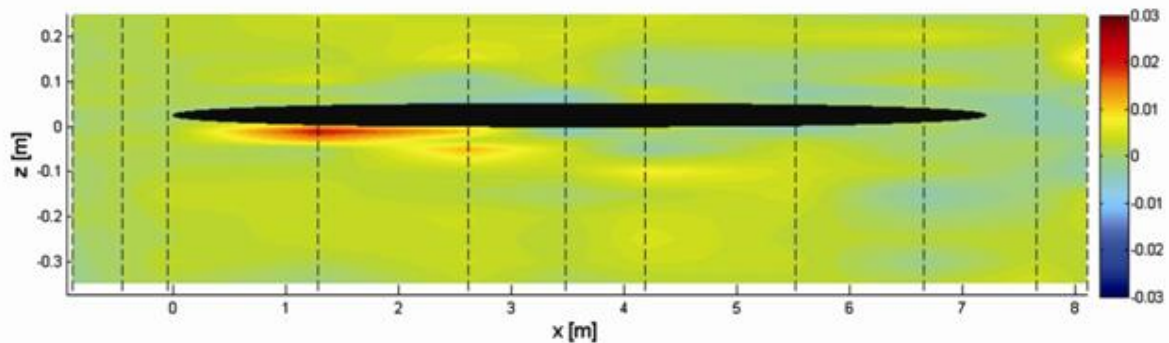


Fig. 7. Transverse velocities ( $U_y$ ,  $\text{m.s}^{-1}$ ) on the median plan of the 7.2 m table. Dotted lines represent LDV measurement locations.

a two-component Particle Image Velocimeter for global information on the flow.

LDV is a laser-based method used to measure the flow velocity at a given point, thanks to Doppler effect. The laser beam generator emits two pair of beams, one for each velocity component being measured, which intersect at a known distance from the probe. When two coherent, collimated laser beams intersect, they form an interference fringe pattern. The intersection location defines the measurement region. The spacing between interference fringes is a known function of the laser wavelength and the separation angle between the two laser beams. Small tracer particles are used to follow the fluid flow through the measurement region by means of laser light reflection (when passed through a fringe). The seeding particles used for our experiments are  $15\text{ }\mu\text{m}$  diameter silver particles. The velocity can be calculated from the reflection frequency and the spacing between interference fringes. The available LDV device allows to measure two velocity components thanks to two wavelengths (514.5 nm and 488 nm) as described in Pichot [15]. The velocity components are measured along the x and y directions.

A particular feature of the LDV measurements is that the number of data recorded in a given time window is strongly dependent on the local seeding conditions: measurements are only possible when a particle moves across the measurement volume. Some regions therefore allowed high frequency acquisitions (exceeding 35 Hz); whereas close to the walls or near recirculating zones, the acquisition rate falls to very low values (lower than 5 Hz). In order to achieve as the most homogeneous sampling possible, an inhibit method was used and data was recorded under time control

rather than sample length control. This technique allowed to obtain a sample length never exceeding 100 s (which is an order of magnitude larger than the time scale of the flow fluctuations) with a number of data points per sample never exceeding 3500. The long time span allows an accurate estimate of average values for velocity and turbulence intensity.

Nowadays, PIV is the most used velocity measurement technique in fluid-mechanics. This success results from the fact that it provides information over the flow field, at many points simultaneously. The PIV is a very simple non-intrusive technique. The fluid is seeded with tracer particles (the same as for LDV) and the region under investigation is illuminated by a laser. A picture of the illuminated region is captured and a second picture is taken a short time period later. The analysis of these images yields the particles displacement [25]. The velocities are obtained by dividing the distance by the elapsed time between laser pulses, and an instantaneous velocity vector map is produced.

A two-chamber Gemini PIV Nid-Yag  $2 \times 120\text{ mJ}$  pulsed laser at 15 Hz is used for the experiments. The camera is a Hi-sense,  $1280 \times 1024\text{ pixels}^2$ , with a focal lens length of 60 mm with a filter wavelength of 3 nm. The measurement plane is typically  $284 \times 227\text{ mm}^2$ . A cross-correlation then produces a vector map from one image map pair. The interrogation area is  $16 \times 16\text{ pixels}^2$  with an horizontal and vertical overlap of 25%. A velocity-range validation rejects vectors outside a certain range given by:  $-0.2 < U < 0.7\text{ m.s}^{-1}$  and  $-0.3 < V < 0.3\text{ m.s}^{-1}$ , where U and V are respectively the in-line velocity and the transverse velocity. Finally, an average filter substitutes each vector with the uniformly weighted average of the vectors in a neighbourhood of a size of  $3 \times 3$  vectors. Instantaneous velocity fields are obtained and

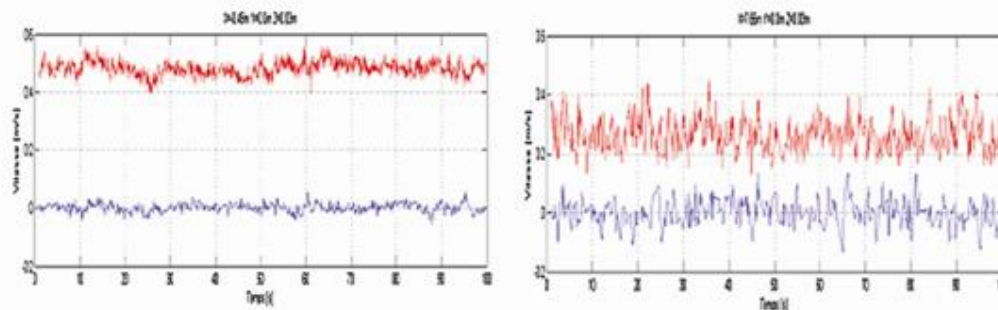


Fig. 8. LDV measurements for  $U_x$  (red line) and  $U_y$  (blue line) at the location  $x = -0.45\text{ m}$  and  $x = 7.65\text{ m}$ , 3 cm above the 7.2 m table during 100s.

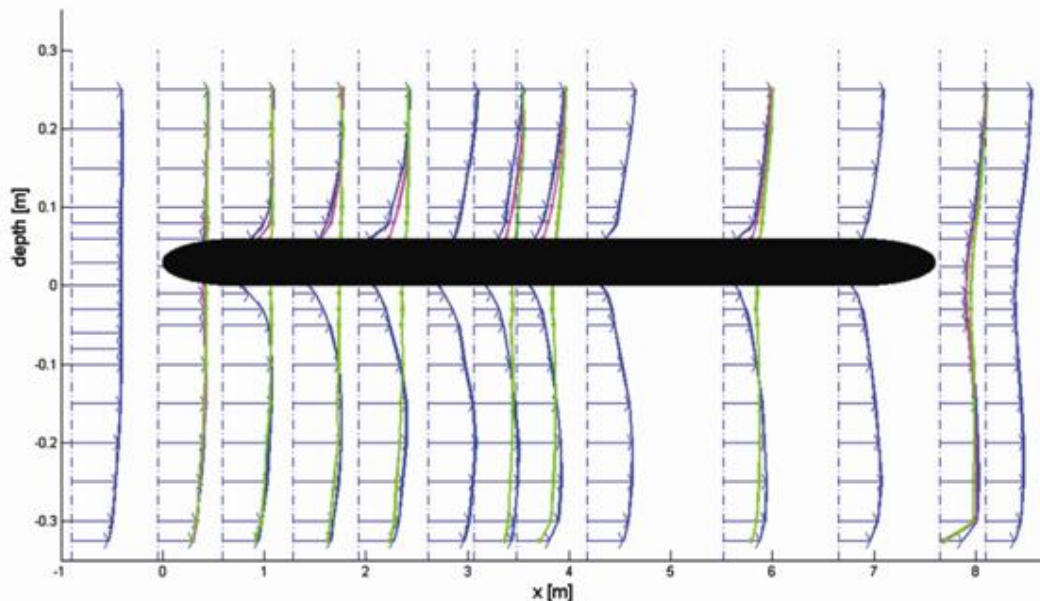


Fig. 9. Velocity vectors at each profile on the vertical median plane (in blue), on the plane  $y = 0.15$  m (in pink) and on the plane  $y = 0.30$  m (in green), for a 7.20 m table.

generally, a series of 80 instantaneous measurements are statistically averaged to get the mean velocity field.

### 2.3. Experimental protocol

These experiments focus on the hydrodynamic phenomena relevant to investigate sediment dynamics. Its aims are therefore:

- to estimate the effect of the table length
- to understand mechanisms which take place around the oyster table (boundary layer development, wake,...)
- to emphasize some areas of flow acceleration or deceleration, particularly near the bottom.

Six vertical measuring profiles (each profile consists of 17 measurement locations) or maps normal to the flow (each map consists of 50 measurement locations) were investigated with the LDV technique on the 3.60 m table and 10 more maps or profiles on the 7.20 m table. Each map is described by 1 horizontal profile and 3 vertical ones (Fig. 4). Moreover, 6 vertical planes were sampled with the PIV technique along the 7.20 m table longitudinal axis. In

order to compare both measurement approaches, LDV profiles were spatially averaged while the records from both systems were processed using the same averaging time lag. Tables were aligned with upstream flow and so were most of the field observations, i.e. incidence effects were not investigated.

### 3. Results

LDV velocities along the 16 monitoring profiles are interpolated in order to generate 2D velocity plots as shown on Figs. 5–16. The extrapolation between two profiles is validated from PIV results. This technique is less accurate (in term of frequency) than the LDV one but provides a global overview of the flow field at a given time. Fig. 5 shows the good agreement between these two techniques at the trailing edge of the table (the most turbulent area of the flow around the table) as well as everywhere above the structure. Note that all velocity fields or profiles are presented with a scale in  $\text{m.s}^{-1}$ .

The 1/2 scale is applied to the table width but not to its length, which should have been of 50 m in order to reach a geometric similarity compared to the field. Because of the important model shortening (3.6/50 and 7.2/50), we first investigated the validity of

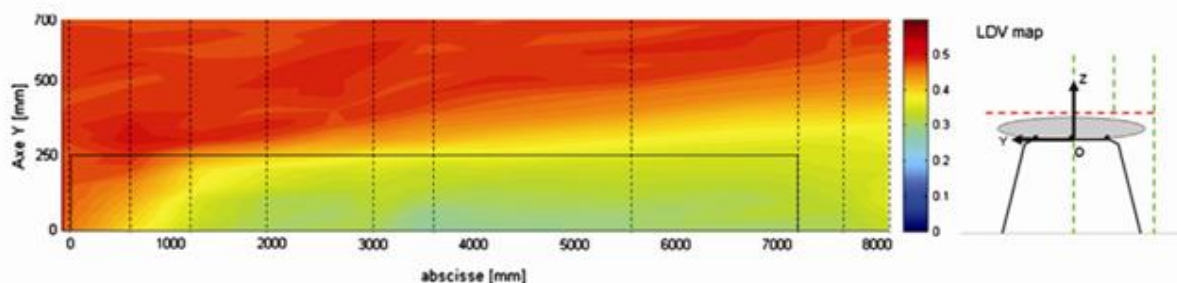


Fig. 10. Longitudinal velocities ( $U_x$ ,  $\text{m.s}^{-1}$ ) on the horizontal plane, in  $z = 0.08$  m, for a 7.20 m table. Dotted lines represent measurement locations.



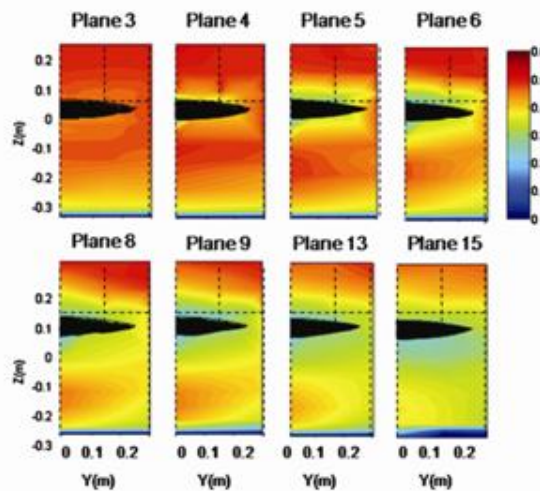


Fig. 11. Longitudinal velocity ( $\text{m.s}^{-1}$ ) maps along the 7.2 m table. Dotted lines represent measurement locations.

the following hypothesis: is the global flow around a 1/2 scale table of less than 10 meters in length representative of the flow around a 50 m length table?

Fig. 6 shows the velocity field around the 3.6 and 7.2 m length tables and the boundary layers development. There are 3 boundary layers around the structure: one above the table called "the upper boundary layer" in the next sections, one below the table and one next to the bottom. The comparison of the two fields shows that the complete development of the upper boundary layer occurs after more than 4 m. The thickness of the well developed upper boundary layer is for this configuration one table height ( $\sim 0.3$  m). This value is 150% higher than for a smooth wall boundary layer (the boundary layer theory predicts in this case a thickness close to 0.12 m to recover 99% of the free stream velocity); this is due to the presence of rough oyster bags. The boundary layer below the 7.2 m

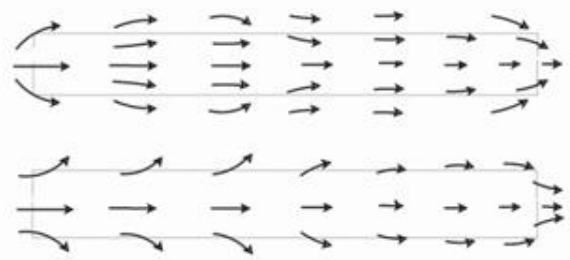


Fig. 13. Velocity vectors above the table (top) and under the table (bottom). Interpretative sketch deduced from the available LDV measurements. For sake of comprehension, transverse component of the velocity is exaggerated.

length table never reaches a full development and continues to increase until it meets the bottom boundary layer. How far these phenomenon will extend? Will the flow speed decrease to zero at a given point? This point is very important in terms of sediment dynamics: a very low flow velocity will lead into a preferential area of silting up.

The effect of the table length was investigated by means of LDV measurements, on a relatively short table as compared to the field equivalent because of the limited size. It is difficult to extrapolate the results to longer tables, even if the upper boundary layer of the table is well-established: we do not know how high the interactions between the lower boundary layer and the bottom one can be. A way to further investigate length effects is therefore to numerically model a table of realistic dimensions in order to understand and to quantify the velocity decrease under oyster tables.

Fig. 7 displays the transverse velocities in the vertical median plane ( $Oxz$ ). The expected symmetry of the flow along the  $x$  direction is satisfied. The red part on the map (less than 4% of the in-line upstream velocity) comes from the hole made at this location ( $x = 1.28$  m) to allow measurements under the table.

Fig. 8 displays the longitudinal and transverse velocity components at 2 locations respectively 45 cm upstream and 45 cm downstream the 7.20 m table. While the upstream velocity components are relatively smooth, the characteristics of the flow

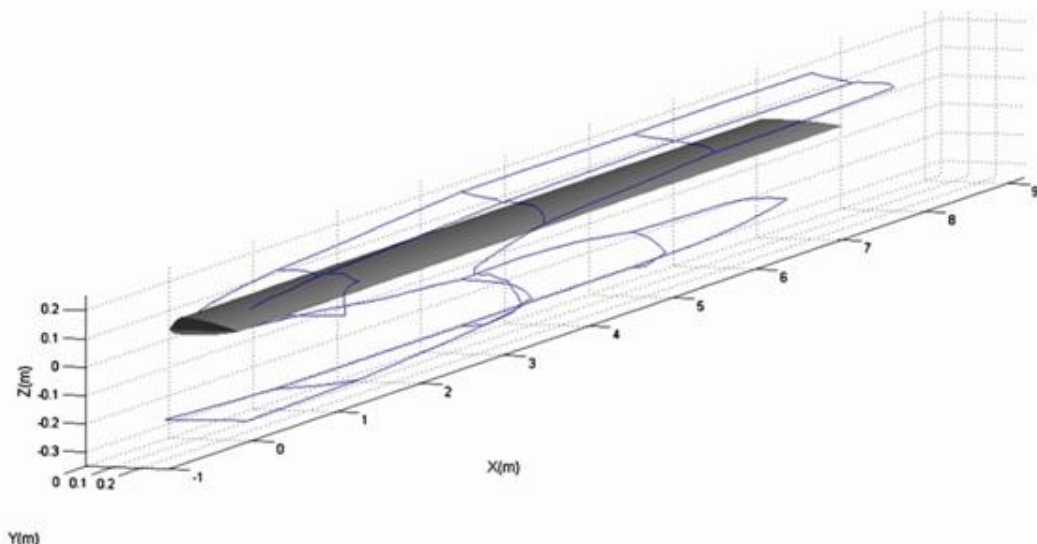


Fig. 12. 3D representation of the 0.4 m/s isovelocity contour around the 7.20 m table.

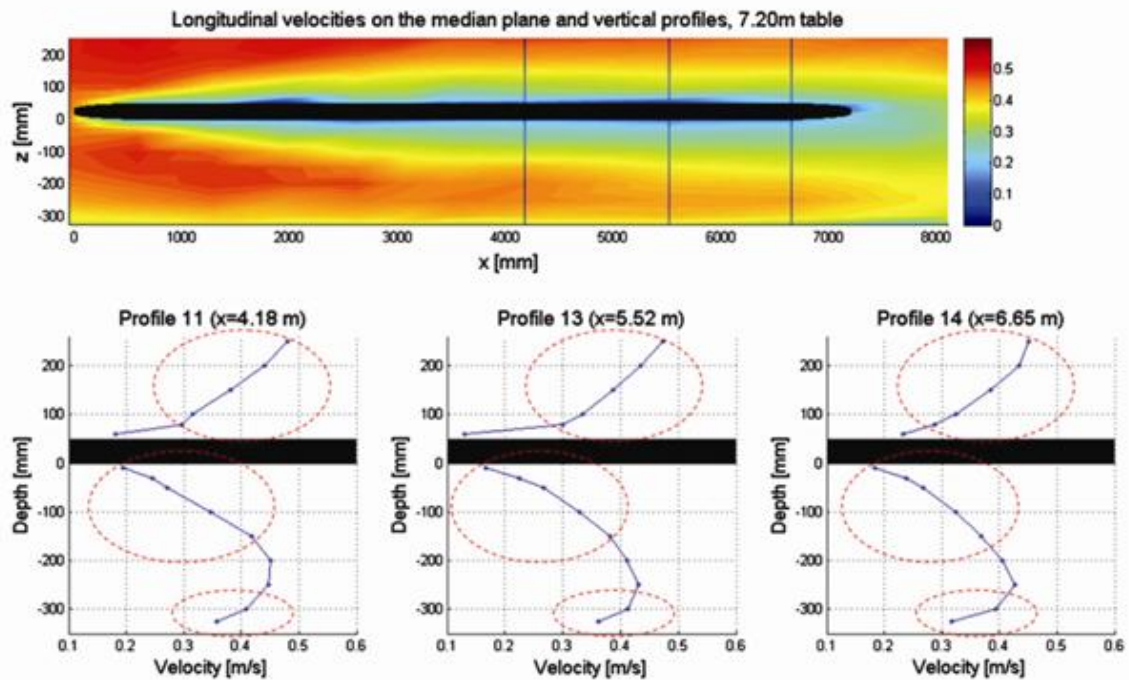


Fig. 14. Velocity profiles along the 7.20 m table.

downstream the table vary in an irregular pattern. It is a characteristic signature of turbulence. The decrease in flow speed is significant too (50% of attenuation).

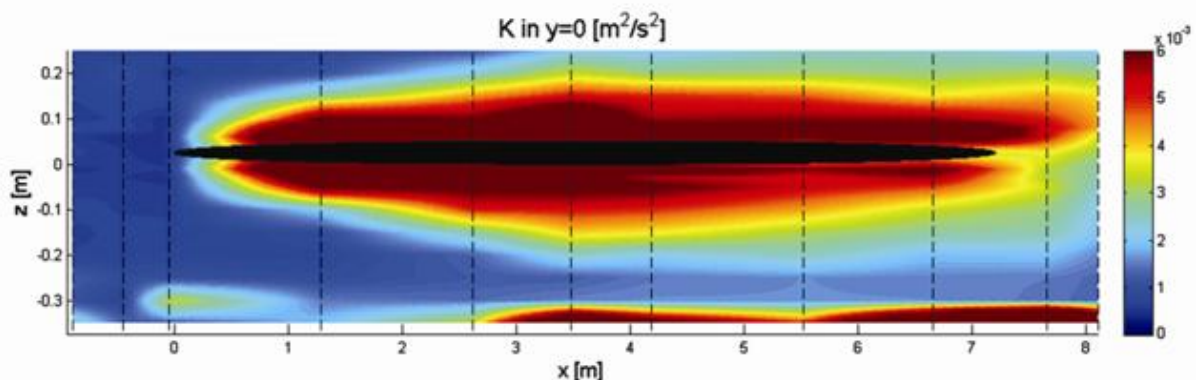
LDV velocity vectors are drawn on Fig. 9. Behind the trailing edge of the table, the two velocity profiles coalesce into one profile in the wake. The magnitude of the depression in the velocity curve is directly connected to the drag on the table. In the case of a flow around a smooth plate at zero incidence and far from the bottom, the drag coefficient of the velocity profile in the wake is calculated by using the momentum equation [18]. We do not attempt to do this calculation due to the complex shape of the oyster bags and the interactions between the structure and the bottom.

Velocity profiles in the other vertical planes, respectively in the planes  $y = 0.15$  m and  $y = 0.30$  m (Fig. 9) give additional information on wake evolution and decrease in speed in 3D.

The broadening of this wake is clear in the plane  $y = 0.30$  m, i.e. 5 cm outside the edge of the oyster bags. At the table level (altitude  $z = 0$ ), the decrease in speed increases with the distance (wake broadening). The same graph highlights an important velocity decrease from under the table down to the ground level, which can be due to the presence of the table supports. In fact, this velocity decrease is higher in the plane  $y = 0.30$  m than in the median plane.

In the plane  $y = 0.15$  m, the wake development is quite similar to the development on the median plane but within a smaller velocity decrease close to the oyster bags.

This wake broadening is confirmed by the horizontal LDV cartography which was carried out 3 cm above the oyster bags (Fig. 10). The wake expands according to the transverse component and some areas exhibit very large decelerations: up to 50% of velocity decrease above the table after half a table length.

Fig. 15. Vertical map in the plane  $y = 0$  of the TKE ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) along the 7.20 m table. Dotted lines represent measurement locations.



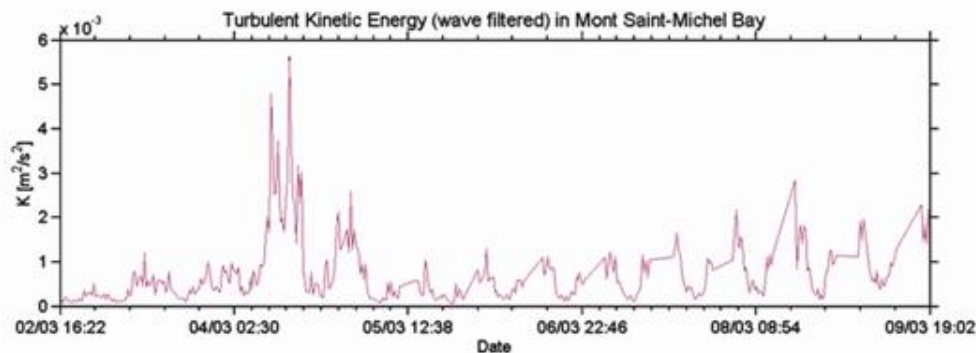


Fig. 16. in-situ Turbulent Kinetic Energy (TKE,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) measurements in Mont Saint-Michel Bay during winter 2008.

In order to fully understand the wake development around the overall structure, LDV longitudinal velocities cartographies along the table (YZ planes) are investigated (Fig. 11).

On the first three planes (planes 4 to 6, see Fig. 4 for the location of the planes), there is a high velocity decrease close to the oyster bags in the area where the wake expands. The boundary layers below the table and above the bottom do not meet in the median plan (the wake exhibits a conical shape under the table). On the last plane (plane 15), just behind the table, the velocity attenuation is above 20% everywhere from the bottom to the table.

Fig. 12 shows a three dimensional representation of the  $0.4 \text{ m s}^{-1}$  isovelocity, which corresponds to a 20% decrease in velocities. The development of the table upper boundary layer is clearly seen after half a table length, where the thickness of the upper boundary layer reaches a stable value. This graph also highlights the merge of the lower boundary layer and the bottom one, which results in a strong velocity decrease. The wakes conical shape under the table is confirmed. The table legs could play a part in the fluid/structure interaction process and could explain this conical shape.

#### 4. Discussions

The main purpose of this study is to determine the local impact of an oyster table on the hydrodynamics on the one hand, i.e. in terms of circulation modifications and current dissipation, and on sediment dynamics on the other hand, i.e. in terms of turbulence near the bottom and sediment motion. To this aim, maps of turbulent kinetic energy and Kolmogorov microscale are examined in order to localize areas of flocculation or fragmentation.

##### 4.1. Hydrodynamics: the local impact of an oyster table on the flow

###### 4.1.1. Trajectories around the table

The mean flow trajectories in the table near-field are summed up on Fig. 13. Above the table, the flow skirts round the leading edge of the table, comes back to the main direction and finally converges at the trailing edge of the table. The flow slows down along the table while the upper table boundary layer develops.

Under the table, the merging of the lower table and the bottom boundary layer induces areas of strongly reduced flow velocities. The main flow diverges through the table lateral edges in the first meters and then comes back to the main direction. The impact of an oyster table on the flow trajectories is asymmetric (different above and under the table), maybe due to table legs and bottom presence under the table.

###### 4.1.2. Shear stress and dissipation

The oyster farm-related drag could be expressed in terms of a Strickler coefficient  $k$ . The Strickler coefficient is linked to the bottom roughness and is often used in numerical models to compute the friction on the bottom. This section is devoted to the determination of the table-induced and bottom-induced shear stresses and the Strickler coefficients within and without the oyster structure.

In order to determine the roughness length  $z_0$ , the shear velocity and then the shear stress, the velocity profiles obtained by the LDV method are used (Fig. 14). Each profile is split into three parts: one above the table, another one under the table and the last one near the bottom. For each part, an hypothesis of a well-established flow is done and the velocity profile is given by the Von Karman–Prandtl equation [23]:

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

where:  $u^*$  is the friction velocity (or shear velocity),  $z_0$  is the roughness length,  $\kappa$  is the Von Karman's constant ( $\kappa = 0.4$ )

Two areas of calculation are distinguished: an area upstream the table where the parameters are computed without the influence of the structure, and another area along the table, within the influence of the structure. For the latter area, the total shear stress on the whole water column is computed for each profile by summing up the local shear stresses (Table 1).

A linear regression in semi-log coordinates is performed on each part of the experimental velocity profiles and gives  $z_0$  and  $u^*$ . The shear stress  $\tau$  is computed from  $\tau = \rho u^{*2}$ .

The different values of  $z_0$  and  $\tau$  above and under the table could be explain by different geometries: above the table, there is a succession of bags which can be compared to sand ridges, and under the table the profile of the bags is flatter due to the presence of horizontal iron bars.

The velocity profile upstream the table (in  $x = -0.90 \text{ m}$ ) gives a roughness length of  $3.10^{-5} \text{ m}$  and a bottom shear stress of  $0.52 \text{ N}$ .

The presence of the oyster table entails a total shear stress ten times higher than the shear stress without the structure.

According to  $\tau = \rho g u^2 / k^2 h^{1/3}$ , the Strickler coefficient  $k$  is often used to parameterize coastal hydrodynamic models current dissipation. Oyster farming areas should therefore be characterized by a Strickler coefficient  $\sqrt{10}$  smaller than without oyster farms.

Nevertheless this value is overestimated since in an oyster farm there are rows of oyster tables and alley without tables too (Fig. 1). Cayocca et al. [4] used a Strickler coefficient divided by 1.8 for mussel farms areas modelling. In previous physical experiments

**Table 1**  
roughness length  $z_0$ , shear velocity  $u^*$  and shear stresses  $\tau$  in profiles 11, 13 and 14.

	Profile 11 ( $x = 4.18$ m)	Profile 13 ( $x = 5.52$ m)	Profile 14 ( $x = 6.65$ m)
$z_0$ above the table (m)	0.012	0.011	0.010
$u^*$ above the table (m/s)	0.064	0.061	0.057
$\tau$ above the table (N)	4.12	3.69	3.27
$z_0$ under the table (m)	0.003	0.003	0.003
$u^*$ under the table (m/s)	0.033	0.032	0.027
$\tau$ under the table (N)	1.08	1.02	0.75
$z_0$ near the bottom (m)	0.0002	0.0002	0.0015
$u^*$ near the bottom (m/s)	0.029	0.029	0.045
$\tau$ near the bottom (N)	0.83	0.85	2
$\tau$ total (N)	6.03	5.55	6.02

[21], it was shown that the Strickler coefficient is divided by 1.4 to 2.5 in mussel farms.

#### 4.2. Sediment dynamics close to an oyster table

##### 4.2.1. Bottom shear stress

Near-bed velocities and shear stresses both drive the sediment particles motion [25]. The bottom shear stress upstream the oyster table is 0.52 N. Due to the presence of the structure and in spite of the flow slower velocities, the bottom shear stress  $\tau$  increases under the table: it reaches 0.8 N for the 2 firsts profiles and 2 N for the last one. Since the sediment motion is initiated by a critical value of this bottom shear stress  $\tau$ , this increase of  $\tau$  is significant. Nevertheless, these values must be examined with a critical eye: the linear regression on the velocity profile close to the bottom is based on two points only. The value of 2 N, at a location where there is an important interaction between the boundary layers, is not very reliable. This attempt of bottom shear stress calculation need therefore to be validated by direct measurements of turbulent velocity fluctuations and Reynolds shear stresses ( $\rho \langle u'_x u'_z \rangle$ ) in future studies.

The generalization of this increase of the bottom shear stress is difficult due to the length of the model table compared to an oyster table in the field, but these results highlight the importance of this parameter.

##### 4.2.2. Turbulence and suspended matter

Since oysters locally produce fine particles it is very important to determine turbulence in the water column under the oyster table. Via flocculation and fragmentation processes, turbulence controls the size and the settling velocity of this suspended matter and so affects sediment transport and deposition.

The energy of turbulent dissipation is investigated by a turbulent-closure model  $K-\varepsilon$ , function of the Turbulent Kinetic Energy (TKE)  $K$  and the dissipation rate  $\varepsilon$ :

$$K = \frac{1}{2} (\overline{u'^2_x} + \overline{u'^2_y} + \overline{u'^2_z}) \quad \text{and} \quad \varepsilon = C_v \frac{K^3}{l}$$

where  $u'_x$ ,  $u'_y$  and  $u'_z$  are the fluctuating parts of the velocity,  $C_v$  is a dimensionless constant equal to 0.09 [13] and  $l$  is the mixing length, here equal to 0.25 (oyster bag characteristic length).

LDV measurements only give access to the horizontal velocity components of the flow. The previous figures suggest that the flow has the same way of skirting round the table along the  $y$ -direction and along the  $z$ -direction. So, the assumption is made that the fluctuating part of the vertical velocity component is equal to the fluctuating part of the transverse velocity component, i.e.  $u'_z = u'_y$ .

Under this hypothesis, the TKE distribution around the overall table in the median plane is calculated and shown on Fig. 15. TKE values decrease away from the structure, with maximum values of  $0.006 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  close to the oyster bags and to the bottom. "Table-induced" TKE does not propagate to the bed: the oyster table has an impact on the water column, in terms of turbulence, but not directly on the bed. Note that the TKE of the upstream flow is six times lower than that measured close to the table.

TKE values measured *in-situ* close to the bed without oyster farms are presented on Fig. 16. These values, measured by means of an Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), are estimated using velocity variances filtered from the wave contribution [27]. They are of the same order as our experimental ones near the table. Thus, it affects in the same manner the lower part of the water column. So, in an oyster farming area, bed roughness and oyster structures both contribute to turbulence in the water column, despite the fact that the oyster structure does not directly affect bed sediments.

Fig. 15 results suggest that the interaction between the bottom boundary layer and the table-induced one has an impact on the rate of turbulence close to the bottom. Note that the TKE values upstream the table, i.e. the background level of turbulence, are negligible opposite to table-induced values.

The TKE produced by the table can also affect flocculation and fragmentation processes of suspended particulate matter. In order to evaluate some preferential area of flocculation or fragmentation, the Kolmogorov microscale is calculated:

$$\eta = \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}, \quad \text{where } \nu \text{ is the kinematic viscosity of water.}$$

The Kolmogorov microscale characterizes the smallest turbulent structures of the flow. At this scale, vortices dissipate kinetic energy in viscous form.

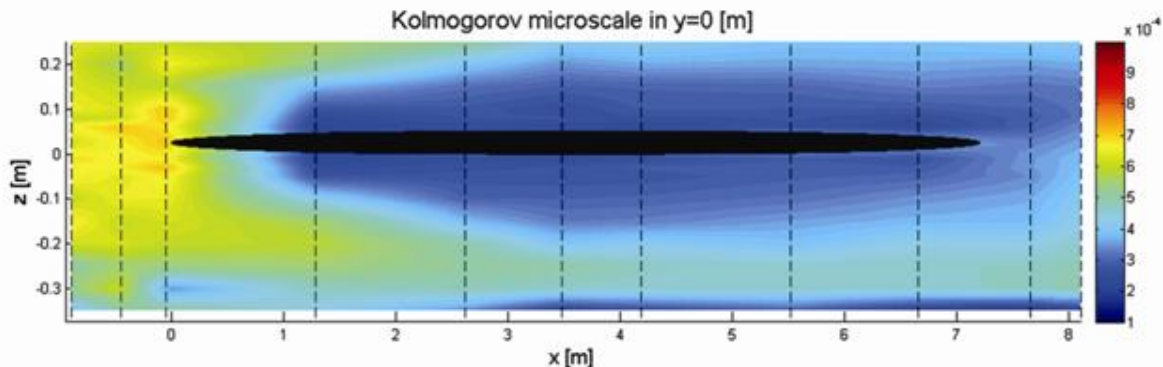


Fig. 17. Vertical map at  $y = 0$  of the Kolmogorov microscale ( $\eta$ , m) along the 7.20 m table. Dotted lines represent measurement locations.



Fig. 17 displays the map of Kolmogorov microscale in the median plane. The oyster table modifies the flow in the whole water column. Around the structure, a preferential area of fragmentation is created (area in blue). Below the table, this area is half an oyster table height from the oyster bags. In this fragmentation area, conditions are not favourable to sediment flocculation and the size of particles will not exceed 300  $\mu\text{m}$ , i.e. the size of the microscale.

Flocculation processes are very complex due to the suspended particulate matter rates and organic contents, more particularly in the case of oyster faeces production. More precise studies are needed to go further on this point.

## 5. Conclusions

The near-field impact of an oyster table on flow has been investigated in a flume tank. These experimental results highlight an asymmetric development of boundary layers around the overall structure, with some important areas of flow slowing down, particularly under the table. When the bed shear velocity exceeds the particles fall velocity, the sediment particles can be lifted and may be transported in suspension. That is what happens in the field where currents are sufficiently strong to transport sediments in suspension. But this study results highlight the fact that oyster farms can locally modify the strength of the currents by creating new boundary layers and so on can modify sediment transport and can cause preferential locations of silting up.

Moreover a significant part of the water column is affected by the presence of the structure; a large fragmentation area is created just below the oyster bags, according to the Kolmogorov microscale distribution. An oyster structure will therefore locally play a role in the behaviour of suspended matter.

The roughness length, the shear velocity and the shear stress were calculated with and without the oyster table. The total shear stress within the structure is ten times higher than the shear stress without the structure. The presence of oyster tables is very important for current dissipation, more particularly for a wide extension modelling, at the scale of a bay.

These results also show the effect of the table length. We can see especially differences in the establishment of the upper table boundary layer and in the interactions between the lower table and the bottom boundary layers. Nevertheless, numerical studies are needed to improve this effect of the table length with a modelling of more realistic lengths.

This study has led to a better understanding of several important issues related to coastal flow and will be used for the calibration of a computational fluid dynamics (CFD) model within the same configuration as the experimental one. After validation, this CFD model could be extended to several directions of the flow towards table alignment, and to several tables' configurations too, even if future experimental studies on incidence effects and for different upstream velocities will be needed. A specific study to evaluate the possibility to use this model at higher scales will be of great interest to give information at the scale of an oyster farm.

## Acknowledgements

The authors wish to thank the Région Basse-Normandie for its financial support of this work carried out in the flume tank of IFREMER.

## References

- [1] S. Bahé, Conchyliculture et dynamique morpho-sédimentaire en Baie du Mont Saint-Michel, Mémoire de Master, EPHE, 2003, pp. 161.
- [2] P. Bassoulet, P. Le Hir, D. Goulet, S. Robert, 2000, Sediment transport over an intertidal mudflat: field investigations and estimation of fluxes within the "Baie de Marennes-Oléron" (France), *Continental Shelf Research* 20 (2000) 1635–1653.
- [3] T.J. Bouma, L.A. van Duren, S. Temmerman, T. Claverie, A. Blanco-García, T. Ysebaert, P.M.J. Herman, Spatial flow and sedimentation patterns within patches of epibenthic structures: combining field, flume and modelling experiments, *Continental Shelf Research* 27 (2007) 1020–1045.
- [4] F. Cayocca, P. Bassoulet, P. Le Hir, H. Jestin, and P. Cann, Sedimentary processes in a shellfish farming environment, Mont Saint-Michel Bay, France, *Sediment and ecohydraulics, Proceedings INTERCOH 2005*, 2008, pp. 431–446.
- [5] M.C. Christie, K.R. Dyer, P. Turner, Sediment flux and bed-level measurements from a macrotidal mudflat, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* vol 49 (1999) 667–688.
- [6] J. Deloffre, R. Lafite, P. Lesueur, S. Lesourd, R. Verney, L. Guézennec, Sedimentary processes on an intertidal mudflat in the upper macrotidal Seine estuary, France, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* vol 64 (2005) 710–720.
- [7] J. Deloffre, R. Verney, R. Lafite, P. Lesueur, S. Lesourd, A.B. Cundy, Sedimentation on intertidal mudflats in the lower part of macrotidal estuaries: sedimentation rhythms and their preservation, *Marine Geology* vol 241 (2007) 19–32.
- [8] K. Guizien, Etude du champ de vitesses sous une et plusieurs plaques soumises à la houle et immergées près du fond, mémoire de DEA, 1996.
- [9] S. Kervella (a), Y. Kervella, Severe storm effects on stability of cohesive sediments in oyster farming area, within the « Baie de Marennes-Oléron » (France), in preparation.
- [10] Y. Kervella (b), F. Cayocca, R. Verney, H. Jestin, P. Bassoulet, P. Cann, P. Le Hir, and P. Lesueur, The impact of oyster structures on hydrodynamics in a macrotidal environment, in preparation.
- [11] R. Kirby, R.J. Bleakley, S.T.C. Weatherup, P.J. Raven, N.D. Donaldson, Effect of episodic events on tidal mudflat stability, *Armillan Bay, Strangford Lough, Northern Ireland*, 1993.
- [12] C. Lundquist, C. Pilditch, Shellfish on the move: predicting recovery of coastal habitats, *Water & Atmosphere* 14 (1) (2006) 12–13.
- [13] N. Matsunaga, Y. Sugihara, T. Komatsu, A. Masuda, Quantitative properties of oscillating-grid turbulence in an homogeneous fluid, *Fluid dynamics research* vol 25 (1999) 147–165.
- [14] J. Nikodic, Dynamique sédimentaire dans la partie occidentale de la baie du Mont-Saint-Michel, Université de Nantes Thèse de doctorat, 1981.
- [15] G. Pichot, G. Germain, D. Priour, On the experimental study of the flow around a fishing net, *European Journal of Mechanics B/Fluids* (2008).
- [16] D.R. Plew, The hydrodynamic effects of long-line mussel farms, PhD thesis, University of Canterbury, 2005, pp. 330.
- [17] M. Ropert, Caractérisation et déterminisme du développement d'une population de l'annélide tubicole *Janice Conchilegia* associé à la conchyliculture en Baie des Veys (Baie, 1999).
- [18] Schlichting, Boundary-layer theory, Seventh ed. Mac Graw-Hill Classic Textbook Reissue Series, 1979, ISBN 0-07-055334-3, pp. 817.
- [19] SeaMER, Etude d'impact de la restructuration conchylicole en baie du Mont Saint-Michel, étude courantologique et sédimentologique, rapport SRC Bretagne Nord, 2000, pp. 41.
- [20] R. Silva Jacinto, Ch. Bessineton, F. Levoy, C.H. Védieu, S. Lesourd, H. Roussel, L. Benoît, H. Jestin, O. Monfort, Réponse de la vasière Nord aux forçages météo-océaniques, Rapport final du thème Hydrodynamique et Transport Sédimentaire, programme scientifique Seine Aval, avril 1998, pp. 99–111.
- [21] SOGREAH, Amélioration de la mytiliculture dans la Baie de l'Aiguillon, Rapport LCHF, 1986.
- [22] Sornin, Processus sédimentaires et biodéposition liés à différents modes de conchyliculture, thèse de l'Institut des Sciences de la Nature de l'Université de Nantes, 1981, pp. 188.
- [23] R.L. Soulsby, Dynamics of Marine Sands. A Manual for Practical Applications, Thomas Telford, London, 1997, 249p.
- [24] C. Tessier, Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière: l'exemple de la région marine Bretagne Sud, thèse, université Bordeaux-1, 2006, pp. 386.
- [25] L.C. van Rijn, Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands, 1993.
- [26] R. Verney, J. Deloffre, J.C. Brun-Cottan, R. Lafite, The effect of wave-induced turbulence on intertidal mudflats: impact of boat traffic and wind, *Continental Shelf Research* vol 27 (2007) 594–612.
- [27] R. Verney, J.C. Brun-Cottan, R. Lafite, J. Deloffre, J.A. Taylor, Tidally-induced Shear Stress Variability above Intertidal Mudflats in the Macrotidal Seine Estuary, *Estuaries and Coasts* vol 29 (4) (2006) 653–664.
- [28] R.J.S. Whitehouse, H.J. Mitchener, Observations of the Morphodynamic Behaviour of an Intertidal Mudflat at Different Timescales. In: K.S. Black, D.M. Paterson, A. Cramp (Eds.), *Sedimentary Processes in the Intertidal Zone*, Geological Society, London, 1998, pp. 255–271 Special publication 139.

Des mesures complémentaires avec une vitesse infinie amont de  $0.3 \text{ m.s}^{-1}$  ont aussi été réalisées afin d'estimer l'effet de l'intensité de la vitesse sur la formation des différentes couches limites.

La figure III.14 présente les cartographies de vitesse longitudinale obtenues sur le plan vertical longitudinal médian. Ces vitesses ont été normalisées par rapport à la vitesse infinie amont afin de permettre la comparaison entre les différentes vitesses ( $0.5 \text{ m.s}^{-1}$  et  $0.3 \text{ m.s}^{-1}$ ).

Un développement quasi-identique des couches limites autour de la table et du fond est observé. L'interaction entre la couche limite inférieure de la table et celle du fond est moins rapide, ce qui entraîne une décélération des vitesses moins importante près du fond en sortie de table pour la configuration avec vitesse infinie amont de  $0.3 \text{ m.s}^{-1}$ .

L'intensité de la vitesse n'a donc pas une grande influence sur la formation des couches limites et donc des zones de réduction de vitesse (sous réserve d'une vitesse suffisante pour les développements de couches limites et leurs interactions).

Les résultats des mesures de contraintes de cisaillement réalisées à partir des profils  $uw$  sont exposés dans l'article de la section suivante (« *Boundary layer development and shear stresses measurements around oyster tables* »).

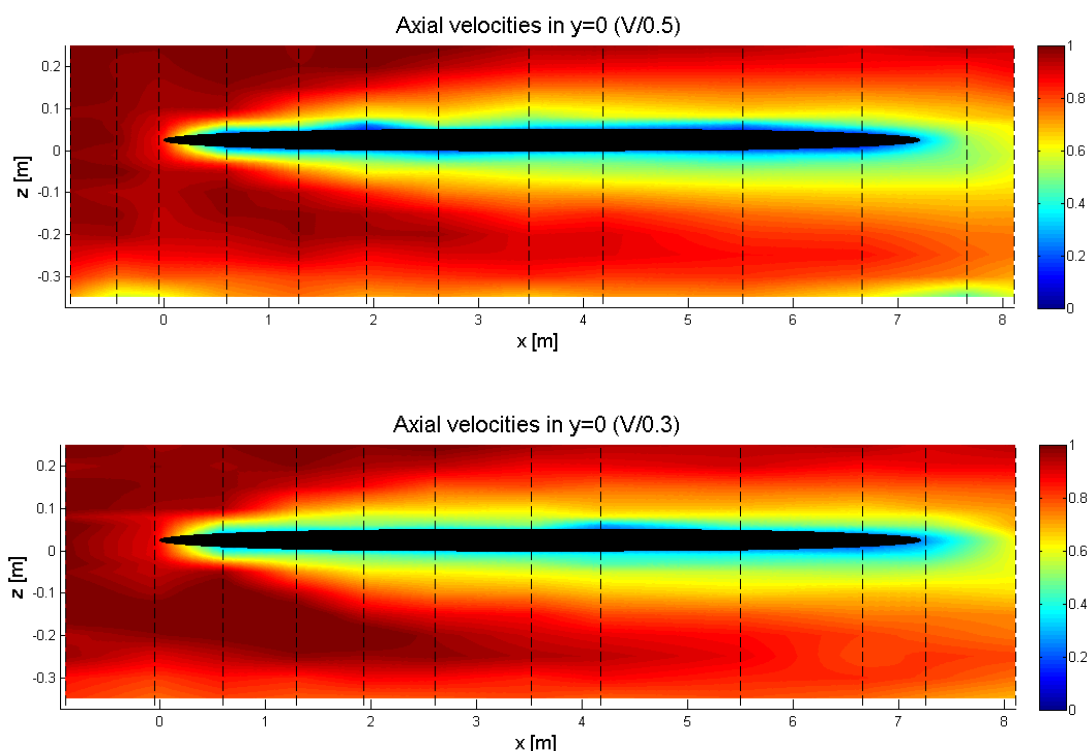


Figure III.14: vitesse longitudinale ( $u$ ) normalisée sur le plan vertical longitudinal médian pour une vitesse infinie amont de  $0.5 \text{ m.s}^{-1}$  (en haut) et une vitesse infinie amont de  $0.3 \text{ m.s}^{-1}$  (en bas). Les pointillés représentent les profils de mesures LDV.



#### III.1.2.4.b) Angle table/courant de 15° (configuration B)

Les résultats acquis dans cette configuration sont présentés dans l'article :

«Boundary layer development and shear stresses measurements around oyster tables» (AMT'09. Conference on Advanced Model Measurement Technology for the EU Maritime Industry. pp.: 358-369).

#### Résumé de l'article:

Dans cette étude expérimentale, les développements de couches limites autour d'une table à huîtres, placée sous différentes incidences vis-à-vis du courant, sont étudiés. Ils révèlent d'importantes zones de réduction de la vitesse infinie amont, qui s'étendent du niveau de la table jusqu'au fond. Ces zones vont être le siège d'une modification du transport sédimentaire en présence et pourront conduire à des envasements locaux. La localisation de ces zones dépend de l'angle entre la table et la direction de l'écoulement principal.

L'extension horizontale des couches limites de la table, i.e. le sillage, dans la configuration B souligne la nécessité de modéliser plusieurs tables afin de comprendre les interactions inhérentes à la succession de telles structures.

Dans la suite de cette étude, les contraintes de cisaillement de Reynolds sont mesurées autour de la table et près du fond pour les configurations A et B. Alors qu'il n'y a pas de modification remarquable au niveau de la contrainte de cisaillement sur le fond au passage de l'écoulement autour de la table, la valeur de la contrainte totale sur la colonne d'eau augmente significativement. Cette augmentation est synonyme de dissipation d'énergie par turbulence et peut entraîner une modification du transport sédimentaire à plus grande échelle en réduisant la vitesse de l'écoulement global.

## BOUNDARY LAYER DEVELOPMENT AND SHEAR STRESSES MEASUREMENTS AROUND OYSTER TABLES

Youen Kervella <sup>a,c,\*</sup>, Grégory Germain <sup>b</sup>, Benoît Gaurier <sup>b</sup>, Jean-Valéry Facq <sup>b</sup>, Florence Cayocca <sup>a</sup>, Patrick Lesueur <sup>c</sup>

<sup>a</sup> IFREMER, DYNECO/PHYSED, Centre de Brest, BP 70, 29280 Plouzané, France.

<sup>b</sup> IFREMER, ERT/HO, Centre de Boulogne, 150 quai Gambetta, BP 699, 62321 Boulogne-sur-Mer, France.

<sup>c</sup> Laboratoire M2C Université de Caen-Basse Normandie, CNRS/INSU UMR 6143, 2-4 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France

\*Corresponding author: [Youn.Kervella@ifremer.fr](mailto:Youn.Kervella@ifremer.fr)

### Abstract

Oyster tables are artificial obstacles which are laid over muddy or sandy-muddy floors in intertidal areas. This study aims to show the current modifications related to the presence of the oyster table thanks to LDV measurement in a flume tank. Boundary layer development in different geometric configuration is underlined and suggests some important areas of velocity decrease and sediment transport modification. Shear stresses are also calculated near the bottom and around the table. The total shear stress in the water column exhibits an important increase when the flow passes through the oyster table, hence a flow energy decrease through dissipation. This study helps to understand the reasons for the increased sedimentation observed in some natural sites.

*Keywords: Oyster table, flume tank, Laser Doppler Velocimetry, boundary layer, shear stress, sediment dynamics.*

### 1. Introduction

An oyster table is a structure made of metallic wire on which porous plastic bags of oysters are laid. This structure which is 100m long by 1m wide is installed over muddy or sandy tidal flats. An oyster farm consists of a set of rows of these tables on a surface area that can reach several squared kilometres. Due to the complex organisation and hydrodynamic context, the impact inherent to this kind of structures has been little investigated so far. The lack of knowledge about the impact of an oyster farm on the flow remains a significant difficulty for the comprehension of sediment transport processes in oyster growing areas.

Since immersed horizontal plates, porous or not, are commonly used in coastal engineering, many references to previous experimental or numerical studies exist. Most of these studies deal with the use of the

plate as a breakwater ([9], [1]). In this case, the structures are located close to the free surface and interact efficiently with the incoming waves. When the plates are located close to the bottom, they can be used as wave energy converters ([2], [4]) or as oyster farming structures, which is our study interest. In the latter case, the horizontal iron wire bars on which meshed plastic bags, filled with oysters, are attached can be compared to horizontal plates.

The impact of oyster tables on the wave pattern has been experimentally investigated by Guizien [3]. Nepf et al. [8] studied a movable structure comparable with oyster or mussel farms submitted to a current. They worked on channel flow in the presence of submerged vegetation, measured mean velocity profiles and discussed on turbulence structures. They concluded that the transport is significantly slower in the layer close to the canopy.

The impact on the flow has also been estimated [7], but with a few restrictions: only one configuration and no direct shear stresses measurements. In order to extend this study, we have investigated and compared two configurations: an oyster table parallel to the mean flow direction and a table with an orientation of  $15^\circ$  in the flow. Like previously, the flow characteristics around the overall structure were determined from velocity measurements obtained by Laser Doppler Velocimetry (LDV).



*Figure 1: Oyster tables, Mont Saint-Michel Bay, France.*

For each configuration, maps of the flow velocity around the table which underline the boundary layer development were first produced. Then, bottom and table-induced shear stresses were measured via turbulent velocity fluctuations. The impact on bottom sediment and on current dissipation is finally discussed.



## 2. Experimental device and geometric configurations

IFREMER flume tank (figure 2) provides an homogeneous current in the range  $[0.15 ; 2 \text{ m.s}^{-1}]$ , with a turbulence rate of the order of 5 % for a  $0.5 \text{ m.s}^{-1}$  flow. The tank working section is 18 m long, 4 m wide and 2 m deep, with transparent 8 m x 2 m side windows for direct observation.

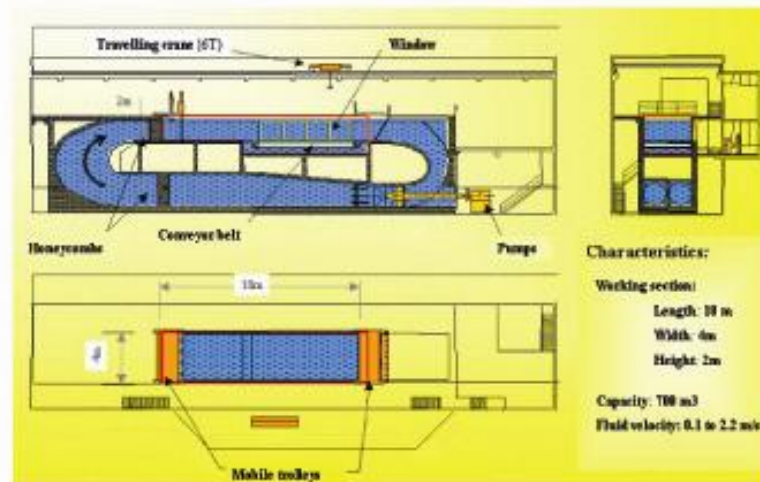


Figure 2: Hydrodynamic water tunnel of Boulogne-sur-Mer (Ifremer).

In the field, an oyster table is typically 100 m long, 1 m wide and 0.7 m high; a good understanding of the sharp current-table interactions drove the choice of a 1/2 scaled model according to Froude similarity. Representing the whole table lengthwise would have required a much greater scale. However, effects of the table length on the flow pattern were investigated through the use of 2 experimental tables 3.6 m and 7.2 m long [7]. A length of 7.2 m gives a good knowledge of the flow interaction with the structure: the length is sufficient enough for the upper boundary layer establishment. These dimensions were also chosen so as to allow multi-orientations in the tank.

The oyster table model was made of 8 mm diameter galvanized iron rod. The oyster bags were manufactured with the same plastic nets as used in the field, but with a 7 mm meshes (half as large as in the field), while the size ratio between reality and experiments was preserved (figure 3). The bags were filled with real pebbles used to simulate oysters. Cylindrical holes were cut out in the middle of few bags in order to allow laser measurements under the table.

In agreement with in-situ measurements [6], the maximum velocity to be investigated was set to  $0.4 \text{ m.s}^{-1}$ , 5 cm from the bottom. In order to reproduce this magnitude in the flume, water flow with a scaled velocity of  $0.28 \text{ m.s}^{-1}$  was generated by the propellers, 2.5 cm above the bottom, which induces a velocity of  $0.5 \text{ m.s}^{-1}$  above the boundary

layer. The 2 m water depth used for these tests corresponds to an intermediate value encountered in the field within oyster farms.



Figure 3: Oyster table model

A two-component Laser Doppler Velocimeter (LDV) was used to characterize the flow around the table: LDV is a laser-based method used to measure the flow velocity at a given point, thanks to Doppler Effect. The laser beam generator emits two pair of beams, one for each velocity component being measured, which intersect at a known distance from the probe. When two coherent, collimated laser beams intersect, they form an interference fringe pattern. The intersection location defines the measurement region. The spacing between interference fringes is a known function of the laser wavelength and the separation angle between the two laser beams. Small tracer particles are used to follow the fluid flow through the measurement region by means of laser light reflection (when passed through a fringe). The seeding particles used for our experiments are 15  $\mu\text{m}$  diameter silver particles. The velocity can be calculated from the reflection frequency and the spacing between interference fringes. The available LDV device allows to measure two velocity components thanks to two wavelengths (514.5 nm and 488 nm) as described in Pichot et al. [2]. The velocity components:  $u$ ,  $v$  and  $w$  are measured along the  $(Ox, Oy)$  or  $(Ox, Oz)$  directions.

A particular feature of the LDV measurements is that the number of data recorded in a given time window is strongly dependent on the local seeding conditions: measurements are only possible when a particle moves across the measurement volume. Some regions therefore allow high frequency acquisitions (exceeding 35 Hz); whereas close to the walls or near recirculating zones, the acquisition rate falls to very low values (lower than 5 Hz). In order to achieve the most homogeneous sampling possible, an inhibit method was used and

data was recorded under time control rather than sample length control. This technique allowed to obtain a sample length never exceeding 100 seconds (which is an order of magnitude larger than the time scale of the flow fluctuations) with a number of data points per sample never exceeding 3500. The long time span allows an accurate estimate of average values for velocity and turbulence intensity.

Two different configurations were investigated in order to evaluate the incidence effect (figure 4):

- In configuration A, the oyster table direction is parallel to the mean flow direction. 33 vertical and 9 horizontal velocity profiles were performed upstream, along and downstream the table structure. Each vertical profile consists of 17 measurement locations. In each location, the longitudinal ( $u$ ) and the transversal ( $v$ ) components of the flow velocity were simultaneously measured during 100 seconds ( $uv$ -profiles).

Furthermore, 4 vertical velocity profiles measuring simultaneously the longitudinal ( $u$ ) and the vertical ( $w$ ) components of the flow velocity were performed along the table during 420 seconds in order to compute shear stresses ( $uw$ -profiles). This data acquisition time is long enough to get convergence on the calculation of the shear stress (based on the velocity fluctuations) figure 5.

- In configuration B, the angle between the oyster table direction and the mean flow direction equals  $15^\circ$ . 66  $uv$ -profiles and 5  $uw$ -profiles were performed around the table.

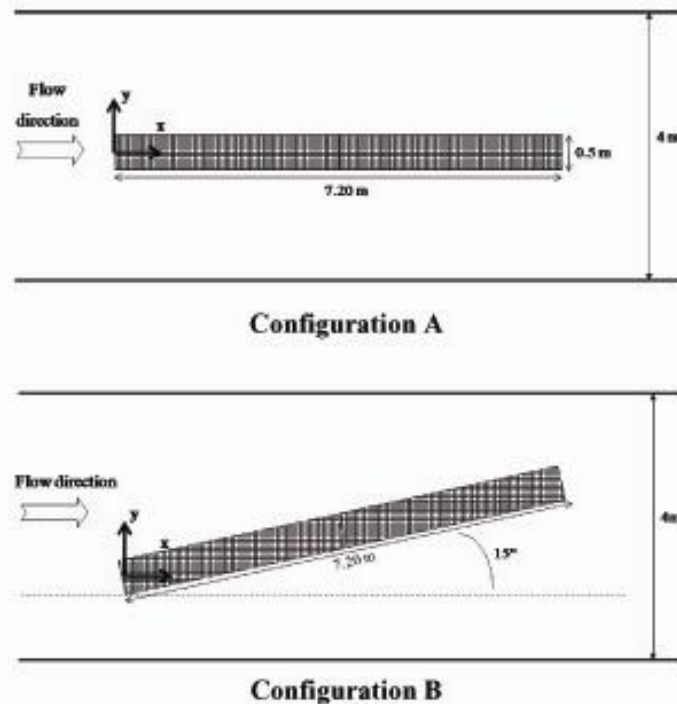


Figure 4: Geometric configurations used in the flume tank (top views).



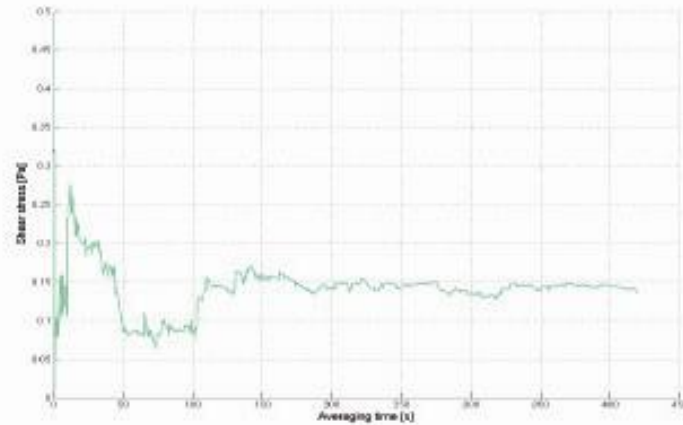


Figure 5: Shear stress convergence according to the averaging time

### 3. Comparison of the boundary layer development for configurations A and B

The configuration A (Oyster table parallel to the mean flow) was investigated in a previous experimental study [7]. Authors highlight an asymmetric development of the boundary layers and an important decrease in flow velocity around the oyster table which suggests the existence of preferential areas for silting up and suspended matter fragmentation under the table.

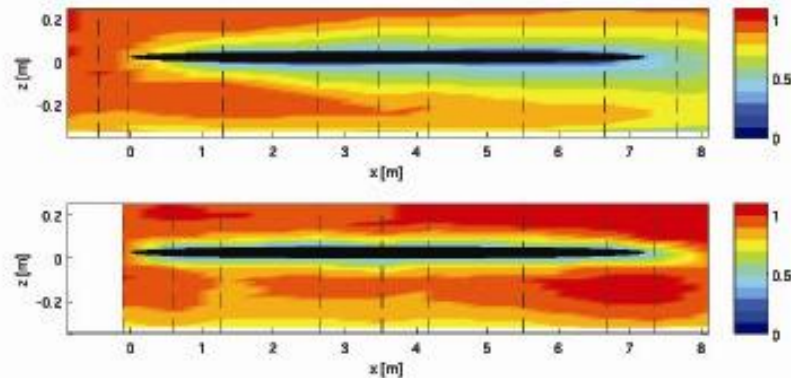


Figure 6: Normalized longitudinal velocities on the median vertical plane for a 7.20 m table in configuration A (top) and in configuration B (bottom). Dotted lines represent LDV measurement locations.

The merging of the table-induced and the bottom-induced boundary layers under the table creates areas where velocity attenuation exceeds 30 % from the table level to the bottom (figure 6, top). For an incoming flow with an angle of  $15^\circ$  (figure 6, bottom), a slight

velocity decrease (up to 20 % of local attenuation) is observed under the table, in the first meters, while a velocity increase occurs close to the end. In this configuration, areas of important velocity decrease are moved away from under the table, as underlined on figure 9. So, the orientation of the table towards the main current direction is essential in the field for sediment transport.

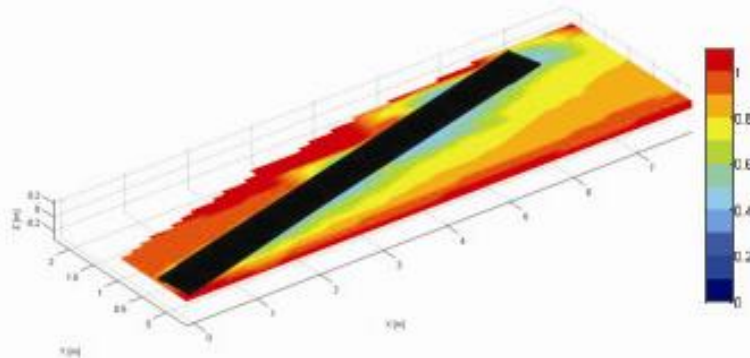


Figure 7: Normalized longitudinal velocities on an horizontal plane at the table level for a 7.20 m table (Configuration B).

In the configuration A, the wake of the table regularly expands according to the transverse component and stays close to the table [7]. In the configuration B, the table's wake broadening is shown in the horizontal LDV cartography at the table level (figure 7). Note the asymmetry of this wake and this important expansion according to the direction perpendicular to the table. Some areas exhibit very large decelerations: up to 40 % of velocity decrease close to the table and up to 30 % of velocity decrease behind this table, while there are acceleration areas (in red) around the wake of the order of 10 % of the upstream velocity.

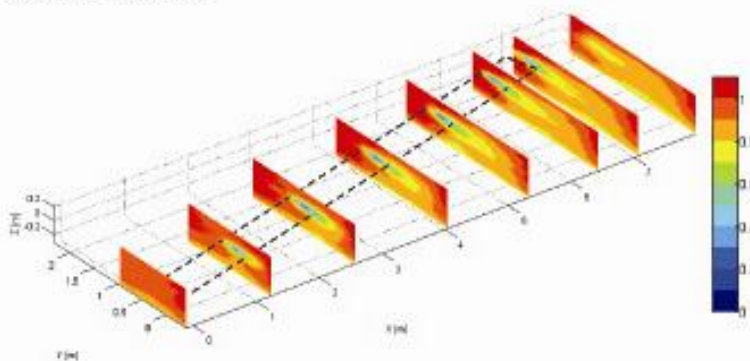


Figure 8: Normalized longitudinal velocities on vertical transverse planes along a 7.20 m table.

This wake broadening is confirmed by the vertical LDV cartographies along the table (figure 8). Note the interaction between this wake,



created by the table, and the bottom boundary layer. A large 3 dimensional area is created along and at the back of the table within decelerations up to 20 %. Just behind the table, the width of this area is stabilized to 1.50 m after 4 m table length.

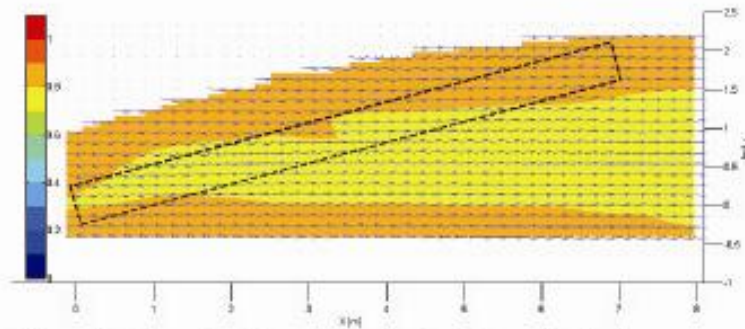


Figure 9: Normalized longitudinal velocities and velocity vectors on an horizontal plane at 5 cm from the bottom for a 7.20 m table.

Figure 9 highlights the development of the bottom boundary layer which is highly influenced by the oyster table presence: a large area from 20 % to 30 % of velocity decrease is created under the table wake at 5 cm from the bottom.

The velocity vectors are also shown on this figure. For sake of visualisation, a transverse exaggeration is applied on the velocity field (the transverse component of the velocity is multiplied by 10). The angle between the main flow and the table direction equals  $15^\circ$ . Just after the table, the main flow is deviated in the same direction as the table orientation, and then comes back to the main direction after the trailing edge of the table. The magnitude of this flow deviation under the table increases from the bottom to the table level.

The horizontal expansion of the wake suggests the occurrence of interactions in realistic configurations where several rows of oyster tables are present. This point should be investigated in the future.

#### 4. Comparison of the shear stresses measurements for configurations A and B

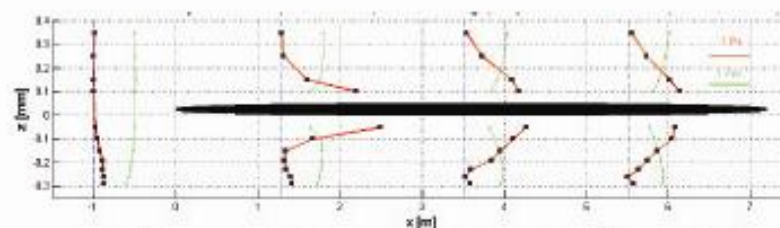


Figure 10: Reynolds shear stresses (red lines) and longitudinal velocities (green lines) on the median vertical plane along a 7.20 m table in configuration A. Dotted lines represent LDV measurement locations.

When performing uw-profiles, velocity fluctuations along the horizontal and vertical velocity components (respectively  $u'$  and  $w'$ ) were recorded at each time. Shear stresses were calculated using the Reynolds shear stress method, also defined as the covariance method:

$$\tau = \rho \overline{u'w'}$$

Values of shear stresses are computed at 4 locations (table 1): one profile upstream the table, without the influence of the structure, and 3 profiles along the table. At each location, shear stresses are calculated close to the bottom ( $\tau_{\text{bottom}}$ ) and for the whole water column ( $\tau_{\text{total}}$ , define as the sum of the bottom shear stress, the lower table-induced and the upper table-induced shear stresses). In the field, bottom shear stress can be determine by means of high-frequency velocimeter (ADV) and the values encountered on flat cohesive sediment in a similar context of mean flow velocity are of the same order than our values (figure 11).

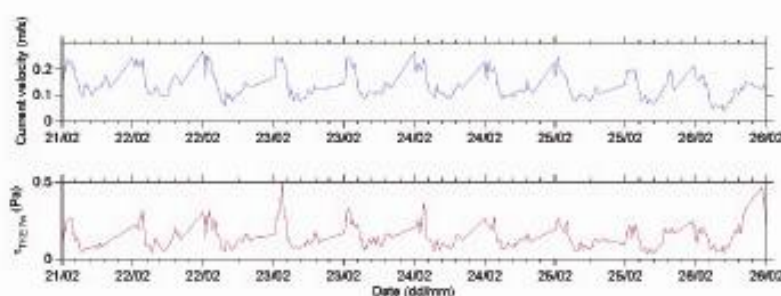


Figure 11: current velocity (m.s-1) and bottom shear stress (Pa) measured in the field 5 cm above the bed in Mont Saint-Michel Bay.

In contrast, total shear stress remains difficult to measure on the whole water column when coastal structures are present and experimental measurement are so needed.

Table 1: Bottom shear stresses and total shear stresses upstream and along the table in configuration A.

	upstream	1,29 m	3,52 m	5,50 m
$\tau_{\text{bottom}}$ (Pa)	0,25	0,25	0,14	0,14
$\tau_{\text{total}}$ (Pa)	0,25	4,45	2,95	2,58

On one hand, we can note a slight decrease of the bottom shear stress under the table after a few meters. This decrease, surely due to the interaction between the bottom boundary layer and the lower table-induced boundary layer, is not really significant and measurements of velocity fluctuations need to be carried out closer to the bottom.

On the other hand, the total shear stress is multiplied by 18 over the first meters of the table and by 10 close to the middle or the end of this table. This increase of the total shear stress value means an area of important energy dissipation of the flow when it goes through the

table. This dissipation will be of great interest in the case of the flow going through an oyster farm of several squared kilometres.

At a smaller scale, the increase of the shear stress close to the table will play an important role in the vertical transport of larvae and nutrients and create important areas of fragmentation [7]. The shear stress created by the macroscopic roughness of the table will increase turbulence and modify the rate of fluid transport. It will affect immigration rates of animals [5].

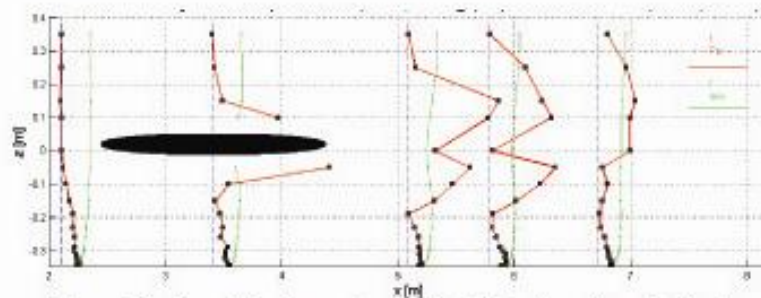


Figure 12: Reynolds shear stresses (red lines) and longitudinal velocities (green lines) on the median vertical plane along a 7.20 m table in configuration B. Dotted lines represent LDV measurement locations.

For the determination of the shear stresses on configuration B, velocity profiles measured by LDV have been extended down to 5 mm from the bottom (against 60 mm in the previous configuration) figure 12.

Table 2: Bottom shear stresses and total shear stresses along the vertical median plane in configuration B

	upstream	X=3.40 m	X=5.08 m	X=6.71 m
$\tau_{\text{bottom}}$ (Pa)	0,32	0,27	0,27	0,27
$\tau_{\text{total}}$ (Pa)	0,32	3,4	2,9	1,4

The bottom shear stress slightly decreases again under and downstream the table. A more important decrease could be probably noticed in another vertical plane parallel to the median vertical plane (see the area of velocity decrease close to the bottom near the table on figures 8 and 9).

As for the total shear stress, its upstream value is multiplied by 11 when the flow is passing through the table (intersection between the median vertical plane and the table). Then this value is multiplied by 9 1.50 m downstream this intersection and by 4 3 m further (table 2). The same conclusions as in the configuration A can be drawn about energy dissipation. Downstream the intersection, the total shear stress decreases but in a configuration with several parallel tables, like in the field, we do not know how the flow and the boundary layer induced by the first table presence will interact with the second and the third tables and what will be the consequences on the total shear stress and



the dissipation. Some numerical studies are necessary to investigate these configurations.

## 5. Conclusion

The impact of an oyster table on the flow within several geometric configurations has been experimentally investigated.

In each configuration, important areas of velocity decrease have been highlighted, from the table level to the bottom. In terms of sediment transport, it involves a decrease of the sediment transport rate and preferential areas of silting up whose location depends on the orientation of the table towards the main flow direction. Moreover, in configuration B, modifications of the flow direction under the oyster table have been underlined close to the bottom, which confirms the in-situ measurements [6]. Moreover, the horizontal extent of the wake behind the table shows that it is fundamental to model, experimentally or numerically, several tables in order to understand the hydrodynamic interactions inherent to the succession of structures.

Shear stress measurements reveal that there is no consistent modification on the bottom, i.e. no direct impact on the bottom sediment but there is an increase of the total shear stress which leads to energy dissipation by turbulence. This energy dissipation will involve an overall flow decrease, and in turn modifications of sediment transport patterns at a greater spatial scale.

A numerical study to model the impact of an oyster table on the flow will be of great interest to give information at a natural structures scale. This kind of modeling will be helpful for the parameterization of coastal hydrodynamics models.

## Acknowledgements

The authors wish to thank M. Debeaumont for his help on the experimental measurements carried out in the flume tank of IFREMER and the Région Basse-Normandie for the financial support of this work.

## References

- [1] Brossard, J., Perret, G., Blonce, L. and Diedhiou, A., 2009. *Higher harmonics induced by a submerged horizontal plate and a submerged rectangular step in a wave flume*. Coastal Engineering, vol. 56, pp. 11-22.
- [2] Carter, R.W., 2005. *Wave energy converters and a submerged horizontal plate*. Thesis of University of Hawaii.

- [3] Guizien, K., 1996. *Etude du champ de vitesses sous une et plusieurs plaques soumises à la houle et immergées près du fond*, mémoire de DEA, 1996.
- [4] Graw, K.U., 1993. *Shore protection and electricity by submerged plate wave energy converter*, European Wave Energy Symposium, Edinburgh, UK (1993), pp. 1–6.
- [5] Hendriks, I. E., van Duren, L. A. and Herman, P. M. J., 2006. *Turbulence levels in a flume compared to the field: Implications for laval settlement studies*. Journal of Sea Research, vol. 55, pp. 15-29.
- [6] Kervella, Y., Cayocca, F., Verney, R., Jestin, H., Bassoullet, P., Cann, P., Le Hir, P. and Lesueur P. *The impact of oyster structures on hydrodynamics in a macro- tidal environment*. To be submitted.
- [7] Kervella, Y., Germain, G., Gaurier, B., Facq, J.-V., Brevers, M., Cayocca, F. and Lesueur, P., 2009. *Experimental study of the near-field impact of an oyster table on the flow*. Submitted to European Journal of Mechanics b. Fluids.
- [8] Nepf, H. And Ghisalberti, M., 2008. *Flow and transport in channels with submerged vegetation*. Acta Geophysica, vol. 56, pp. 753-777.
- [9] Patarapanich M., 1984. *Maximum and zero reflection from submerged plate*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol. 110, 1984.
- [10] Pichot, G., Germain, G., Priour, D., 2008. *On the experimental study of the flow around a fishing net*, European Journal of Mechanics B/Fluids.

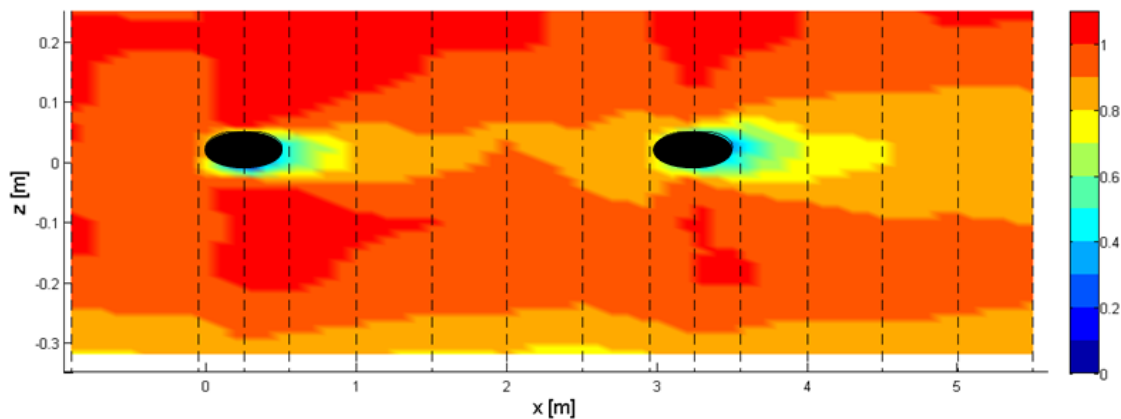
#### III.1.2.4.c) Tables perpendiculaires au courant (configuration C)



*Figure III.15: Placement des poches dans la configuration C (alignement au laser).*

Dans cette configuration, les mesures ont été réalisées uniquement sur le plan vertical longitudinal médian. En effet, au vu de la géométrie des tables et des poches, ainsi que de l'écoulement, la configuration peut être considérée comme étant en deux dimensions (2DH).

Des profils uv sont réalisés en amont, entre et dans le sillage de ces 2 tables afin d'établir une cartographie de vitesses et de comprendre le développement des couches limites de fond et inhérentes aux structures (figure III.16).



*Figure III.16: cartographie de vitesse longitudinale sur le plan vertical longitudinal médian pour la configuration C. Les vitesses sont normalisées par rapport à la vitesse infinie amont. Les pointillés représentent les profils de mesures LDV.*

Nous observons que les développements des couches limites autour des 2 tables sont assez similaires, hormis un effet de masquage de la première table. Cet effet de masquage (propagation du sillage de la première table jusqu'à la seconde) se traduit par un sillage plus étendu verticalement et horizontalement derrière la seconde table.

Notons aussi l'influence de la présence des tables sur le développement de la couche limite de fond. Le passage du fluide autour de la table et son ralentissement en proche paroi créent des zones d'accélération au dessus et en dessous de chaque table. Ces zones d'accélération de vitesse (de l'ordre de 10 % d'augmentation de la vitesse infinie amont) se répercutent sur la couche limite de fond en la déformant localement sous la table.

Des profils  $uw$  sont aussi réalisés dans cette configuration afin d'obtenir l'évolution de la contrainte de cisaillement sur ce plan vertical médian (figure III.17).

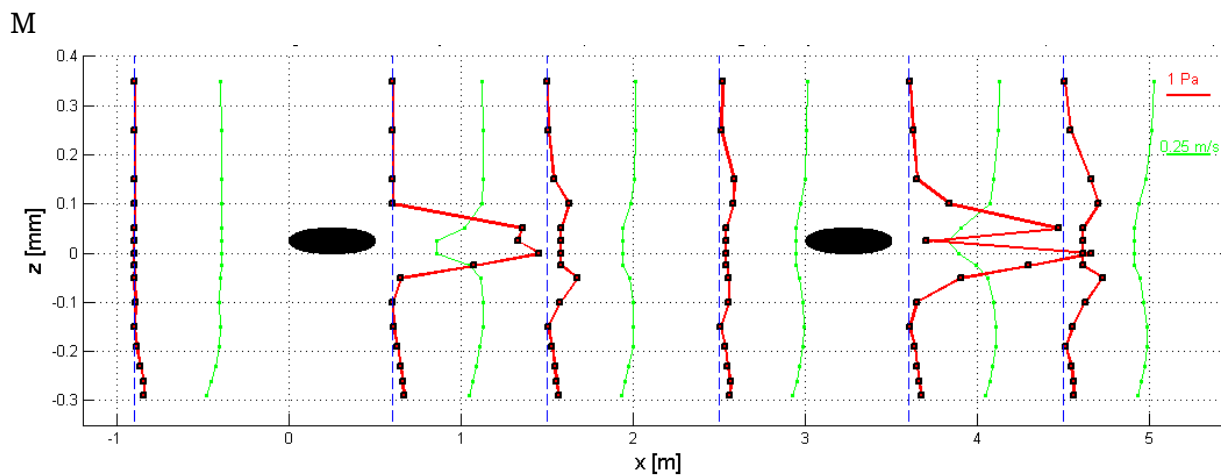


Figure III.17: contraintes de Reynolds (en Pa, en rouge) et profils de vitesse (en  $m.s^{-1}$ , en vert) sur le plan vertical longitudinal médian pour la configuration C.

Au niveau de la contrainte de cisaillement sur le fond, il n'y a pas de modification significative inhérente à la présence des tables. Notons néanmoins que la mesure n'a pu être réalisée directement sous la table (là où les zones de déformations de la couche limite de fond avaient été identifiées), le système LDV pour la mesure des profils  $uw$  ne le permettant pas. Il n'y aurait donc pas d'impact direct de la présence des tables sur le sédiment de fond dans cette configuration.

En ce qui concerne la contrainte totale (sur toute la colonne d'eau), la contrainte en amont est multipliée par 25 juste derrière la première table et par 35 juste derrière la seconde. D'où une dissipation par turbulence de l'énergie du courant très

importante lorsque les tables sont orientées perpendiculairement à la direction principale de l'écoulement.

Notons aussi le « point d'arrêt » derrière la seconde table qui se caractérise par une grande atténuation de la vitesse de l'écoulement (plus de 50 %) et une diminution importante de la contrainte de cisaillement.

Les résultats sur la contrainte de fond ainsi que sur la contrainte totale, vont dans le sens d'une intuition qui dit que mettre les tables perpendiculairement aux principaux courants de marées accroît la vitesse de l'envasement local. En effet, l'augmentation de la turbulence au passage des tables va entraîner des contraintes totales plus fortes et donc augmenter le phénomène de dissipation locale de l'énergie des courants. D'autre part, comme il n'y a pas de modification significative de la contrainte sur le fond, ces sédiments ne vont pas être plus facilement remis en suspension qu'ailleurs. Ce qui tend donc vers une accélération de la vitesse de l'envasement (s'il y a possibilité d'envasement sur le site d'étude).

### III.1.2.5. Conclusions

A travers ces différentes campagnes expérimentales, l'impact en champ proche d'une table à huître sur le courant a été étudié.

Les interactions entre les couches limites de la table et celle du fond sont importantes dans les configurations A et B. Il y a donc, près du fond, création de zones de faibles vitesses qui peuvent, en présence de sédiments, devenir des zones préférentielles de dépôt. La configuration C présente des zones de réduction de vitesse en aval des tables mais pas d'effet direct de celles-ci sur le fond en termes de développement de couche limite (à part de légères déformations locales). On observe néanmoins dans cette configuration, l'effet de la succession de 2 tables et de leur interaction (modification du sillage) ; ce qui souligne la nécessité de modéliser, expérimentalement ou numériquement, plusieurs tables quelle que soit la configuration étudiée.

Au niveau des contraintes de Reynolds sur le fond, il n'y a pas de modification significative due à la présence des tables. La présence de ces structures n'a donc pas d'impact direct sur la remise en suspension des sédiments du fond. Par contre, les tables ont un impact sur la contrainte de cisaillement totale : au passage des structures, quelle que soit la configuration étudiée, la contrainte totale augmente. Ceci a pour effet d'augmenter la dissipation par turbulence et donc de diminuer l'intensité des forçages hydrodynamiques en présence, ainsi que de créer des zones de fragmentation des matières en suspension autour des tables.

Outre la meilleure compréhension de l'écoulement en champ proche d'une structure ostréicole dans un environnement maîtrisé, ainsi que la facilité de



multiplication de mesures précises par rapport aux campagnes in-situ, ces campagnes expérimentales permettent aussi le calibrage d'un modèle numérique d'une structure à l'échelle locale. L'intérêt d'une modélisation numérique, calibrée par les résultats expérimentaux, résulte dans le fait de pouvoir représenter des longueurs de tables qui ne peuvent entrer dans le bassin. Une modélisation d'une ou plusieurs tables à l'échelle réelle est ainsi envisageable. La section suivante est dévolue à la description et aux tests de ce modèle.

### III.1.3. Etude numérique

Cette partie, relatant la modélisation numérique de l'impact local d'une ou plusieurs tables ostréicoles sur le courant, a fait l'objet de deux stages que j'ai co-encadrés avec Benoît Gaurier (ingénieur Ifremer, Boulogne-sur-Mer) :

- De mars à août 2008, Mathieu Brevers, élève-ingénieur en 5<sup>e</sup> année à l'école Polytech Orléans, a travaillé sur l'élaboration du modèle de l'écoulement autour d'une table ostréicole à l'échelle des expériences en bassin ;
- De Mars à août 2009, Julia Davourie, élève-ingénieur en 4<sup>e</sup> année à l'INSA de Lyon, a poursuivi ce travail et a étendu la modélisation à des tables de longueur réelle.

Pour ce faire, ils ont tous les deux utilisé le logiciel de dynamique des fluides FLUENT et le mailleur GAMBIT (tous deux édités par ANSYS, Inc).

Leur démarches ainsi que leurs résultats sont exposés dans leurs rapports de stage respectifs (Brevers, 2008; Davourie, 2009).

Les principaux résultats numériques obtenus, leur comparaison avec les résultats expérimentaux, ainsi que l'extension du modèle à des configurations plus « réalistes » ont donné lieu à l'article présenté ci-dessous.

#### Résumé des principaux résultats de l'article (soumis à *Computers and Fluids*):

3 modèles différents ont été élaborés:

- Modèle n°1, approche par rugosité : la géométrie des poches est finement représentée en 3D tout au long de la table. La géométrie ainsi obtenue est traitée comme un volume solide ayant une paroi rugueuse. Les pieds de la table ne sont pas pris en compte.

- Modèle n°2, approche par porosité : la table est assimilée à un parallélépipède rectangle disposé horizontalement. L'intérieur du volume ainsi obtenu est traité comme une zone poreuse où le fluide est ralenti. Les pieds de la table ne sont pas pris en compte.
- Modèle n°3, approche par porosité + pieds : idem modèle n°2 avec prise en compte des pieds de la table par des parallélépipèdes rectangles disposés verticalement et traités comme des zones poreuses.

Ces trois modèles sont testés avec des conditions aux limites permettant de simuler les différentes configurations expérimentales mentionnées dans la partie précédente (figure III.18).

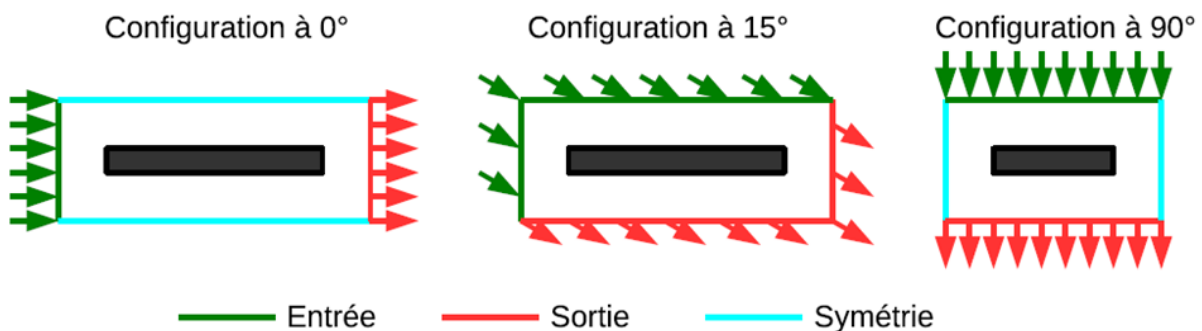


Figure III.18: Conditions aux limites imposées aux modèles afin de simuler les différentes configurations expérimentales.

Le modèle n°1, composé de 113 880 mailles de calcul, représente bien le développement de la couche limite au-dessus de la table. Par contre, nous observons une surestimation des vitesses sous la table et sur les côtés de la table. L'erreur moyenne sur les champs de vitesse par rapport aux profils expérimentaux est de 10.52 %.

Le modèle n°2, composé de 51 840 mailles de calcul, aboutit aux mêmes conclusions que le modèle n°1 quant à la représentation des différentes couches limites. L'erreur moyenne sur les champs de vitesse par rapport aux profils expérimentaux est de 8.29 %.

Le modèle n°3, composé de 205 300 mailles de calcul, donne une bonne représentation des couches limites sur, sous et sur les côtés de la table. L'erreur moyenne sur les champs de vitesse par rapport aux profils expérimentaux est de 5.99 %.

Au vu de ces résultats, le modèle n°3 est donc choisi comme modèle de référence.

Notons que les paramètres turbulents (énergie cinétique turbulente et taux de turbulence) ont aussi été étudiés et concordent avec les résultats expérimentaux.

L'utilisation d'un facteur d'échelle a permis l'extension à des longueurs réelles de ce modèle de référence (passage d'une table de 7.20 m à une table de 100 m). Un modèle regroupant 2 lotissements de 2 tables de 100 m de long a ainsi été créé, avec un courant incident parallèle à la direction des tables, puis avec un angle entre le courant et la direction principale des tables égal à  $15^\circ$ .

Dans la première configuration, des interactions fortes entre les couches limites des tables au sein d'un même lotissement ont lieu. Par contre, il n'y a pas d'interaction entre les lotissements. La perte de vitesse sous table est de l'ordre de 60 à 80 % de la vitesse initiale.

Dans la seconde configuration, le ralentissement est moins important : de 20 à 40 % de la vitesse initiale observé près du fond. Cependant, ces zones de ralentissement sont spatialement plus étendues et des interactions au sein des lotissements et entre ces lotissements sont mises en évidence.

L'extension de ce modèle à un parc ostréicole complet est envisageable par le biais d'hypothèses géométriques simplificatrices.

# Experimental and numerical studies for the characterization of oyster table impact on the flow

Benoît Gaurier<sup>\*,a,b</sup>, Grégory Germain<sup>a,b</sup>, Youen Kervella<sup>c,d</sup>, Julia Davourie<sup>a,b</sup>, Florence Cayocca<sup>c</sup>, Patrick Lesueur<sup>d</sup>

<sup>a</sup>*IFREMER, Hydrodynamic & Metocean Service F-62200 Boulogne-sur-Mer, France*

<sup>b</sup>*Univ. Lille Nord de France, F-59000 Lille, France*

<sup>c</sup>*IFREMER, PHYSED Lab, F-29280 Plouzané, France*

<sup>d</sup>*Univ. Caen, M2C Lab - CNRS/INSU UMR 6143, F-14000 Caen, France*

---

## Abstract

Shellfish facilities, particularly oysters farms, suffer from strong siltation phenomena which are harmful to the production of shellfishes. The lack of knowledge about the impact of an oyster farm on the wave propagation and on the flow remains a significant difficulty for the comprehension of sediment transport processes in coastal zones. These effects are ones of the possible sources of the siltation phenomena.

The study presented here focuses on describing finely hydrodynamical phenomena (velocity fields, turbulence parameters) around oyster tables. The analysis is based on experimental results established during two rounds of trials in a flume tank. These campaigns, carried out on reduced models of oyster tables, highlight the flow perturbations in the field of a unique table and give results for numerical validation of models developed at the same time.

The numerical model used for this study is developed with the Computational Fluid Dynamics (CFD) software Ansys Fluent<sup>TM</sup>. This numerical work is conducted in order to study the impact of more realistic table lengths on the flow and, with the use in a near future of a wide-extension hydrodynamic model, to simulate the perturbation produced by a whole oyster farm. Both experimental and numerical results are presented in this paper.

*Key words:* Sediment dynamics, Oyster table, LDV measurement,

---

\*Corresponding author: Tel: +33 3 21 99 56 33, Fax: +33 3 21 99 56 71  
Email address: [benoit.gaurier@ifremer.fr](mailto:benoit.gaurier@ifremer.fr) (Benoît Gaurier)

## 1. Introduction

Since long-term sedimentation became a real problem for shellfish exploitation in France [16, 14, 2], so it is essential to understand the effects induced by oyster or mussel farms on sediment transport. In fact, modifications of local hydrodynamics by shellfish farming structures have to be added to natural progressive infill processes to explain the observed sedimentation rate in inter-tidal areas of a bay.

In previous studies [15, 3], numerical simulations were carried out in order to estimate the effects of mussel farms on the flow. Seamer [15] used a numerical model of 10 cm mesh to compute hydrodynamics effects of 2.40 m mussel posts of 0.40 m in diameter. The results have shown a decrease of the flow speed upstream a single post as well as in the wake, while the velocity increased on both sides of the post. But a row of posts had no influence on the overall current velocity, local accelerations and decelerations of the flow canceling each other. This study was never validated by experiments or *in-situ* measurements.

Cayocca *et al.* [3] introduced the effects of mussel farms on flow circulation and sediment dynamics into a wide-extension numerical model by increasing the hydraulic roughness used for velocity computations at the location of mussels structures. This study opens a way of modeling mussel or oyster structures implantation at the scale of a bay but needs to be validated and particularly, the local hydrodynamic processes need to be more accurately described.

As for the oyster structures, a decrease of the velocity and a deviation of the tidal flow was locally observed in the field [16]. The impact of these structures on the wave pattern and on the wave orbital velocities was experimentally estimated in [7] with a few restrictions: tables were simply modeled by horizontal solid plates, only studied under wave effects at normal incidence.

A recent experimental study in a flume tank [11] highlights an asymmetric development of the boundary layers and an important decrease in flow velocity around a single and finite length oyster table which suggests the existence of preferential areas for silting up and suspended matter fragmentation under the table. The considered oyster table is a metallic wire structure on

which porous bags containing small oysters are laid in order to grow (figure 1).

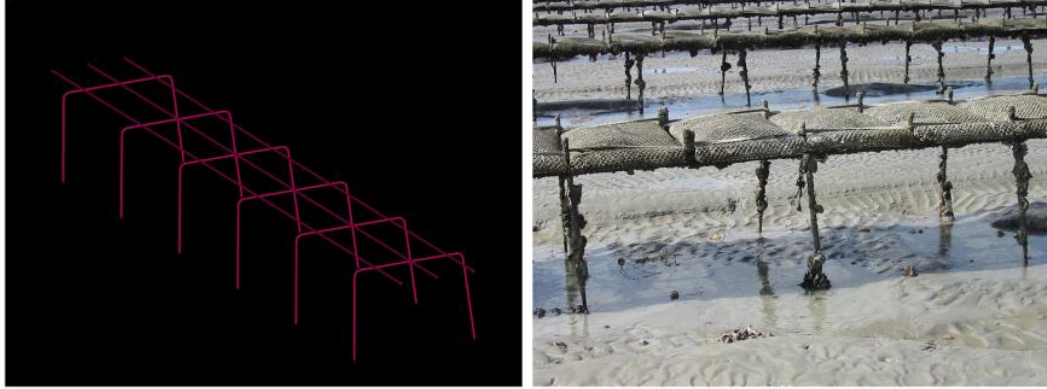


Figure 1: Sketch of an 3.60 m long oyster table without the oyster bags on the left and real table in the field with oyster bags on the right

The oyster table used in this tests is a 1/2 scale, with a finite length of 7.20 m whereas the length of the table model should be 50 m for the modeling of a real table of 100 m. During these experiments, Kervella *et al.* [11] compared the flow perturbation around a 3.60 m and 7.20 m long tables aligned with the flow. It appears that the boundary layers above and under a 3.60 m long table are not both fully developed, while the boundary layer above a 7.20 m long table stops to grow after around 6.50 m while the velocity under the table continues to decrease.

This previous study shows that the length is an essential parameter to reproduce correctly the interaction between the flow and the structure. But real lengths, because of their large dimension, are impossible to obtain in a flume tank. So, numerical simulations are conducted in order to reach these table lengths.

Before to introduce the numerical work achieved during this study, we present an extension of the previous experimental trials for new configurations used for the validation of the numerical model. After the description of this model, we present comparisons of experimental and numerical results. The quality of the results obtained with reduced table length allows to extend to real table size. This work is presented in the last section.

## 2. Experimental study

### 2.1. Setup

Experiments have been carried out in 2008 and 2009 in the IFREMER (French Research Institute for Exploration and Exploitation of the Sea) free surface flume tank in Boulogne-sur-Mer, France (figure 2). The flume tank is 18 m long by 4 m wide and 2 m deep with a side observation window of 8 m  $\times$  2 m. The flow turbulence can be adjusted between 5 % and 30 % and the flow velocity range is: 0.1 to 2.2 m/s.

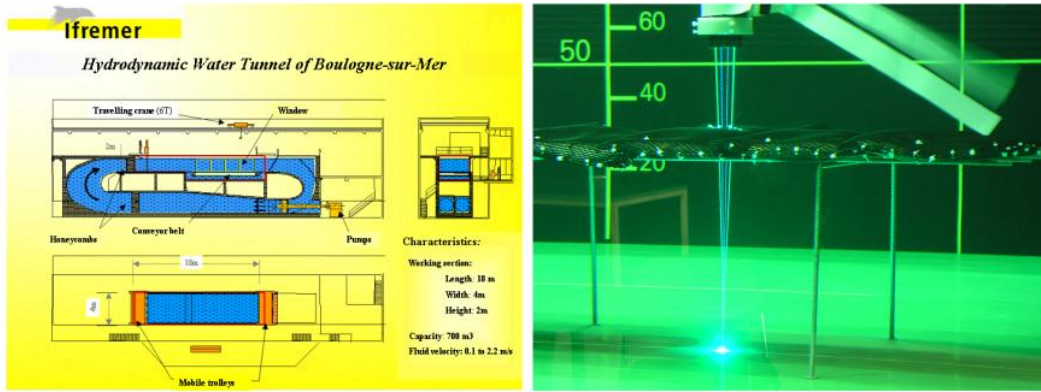


Figure 2: Presentation of the Ifremer flume tank on the left and of the model of the oyster table in the tank during laser measurement on the right

In the field, an oyster table is typically 100 m long by 1 m wide and 0.7 m high. A good understanding of the current-table interactions drive the choice of a 1/2 scaled model according to Froude similarity. Representing the whole table lengthwise would require a much greater scale. However, previous trials [11] show that a length of 7.20 m gives a good knowledge of the flow interaction with the structure: the length is sufficient enough for the upper boundary layer establishment. These dimensions were also chosen so as to allow multi-orientations in the tank, with a low blockage ratio. The oyster table model is made of 8 mm diameter galvanized iron rod. The oyster bags are manufactured with the same plastic nets as used in the field, but with a 7 mm meshes (half as large as in the field), while the size ratio between reality and experiments is preserved. The bags are filled with real pebbles used to simulate oysters. Cylindrical holes are cut out in the middle of a few bags in order to allow laser measurements under the table (figure 2).



So the table model is 7.20 m long by 0.50 m wide and 0.35 m high. The water depth used for these tests is 2 m, the flow velocity is set to 0.5 m/s and the flow turbulence rate is close to 5 %. For a precise localization of the velocity profiles that will be described in the experimental or numerical parts, a global frame of reference  $(O, x, y, z)$  is chosen. The origin is set at the middle of the upstream table side, just under the first bag.  $Ox$  is the in-line axis and also the main flow direction axis,  $Oy$  is the vertical axis and  $Oz$  is the transverse axis (figure 3).

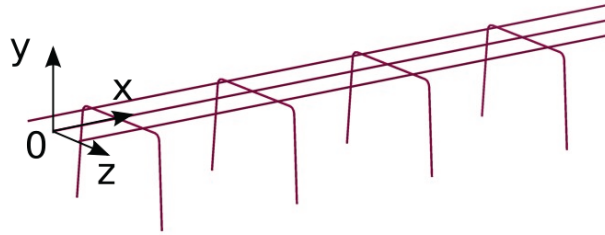


Figure 3: Presentation of the global frame and reference axis  $(O, x, y, z)$

Most of the time in the fields, tables are aligned with the main flow direction, but it is common to see different orientation and sometimes tables are perpendicular to the main flow direction. This “misalignment” can also come from the flow variations along the coast and during the reverse of the flow. In order to have a good idea of oyster table effects on the flow pattern for various conditions, we carry out trials under three configurations:

- in the configuration A, the oyster table direction is parallel to the mean flow direction (figure 4(a)).
- in the configuration B, the angle between the oyster table direction and the mean flow direction equals  $15^\circ$  (figure 4(b)).
- in the configuration C, two oyster tables of 3.6 m long are positioned perpendicular to the mean flow direction (figure 4(c)) and spaced by 2.5 m.

For each configuration about forty vertical and horizontal velocity profiles are performed upstream, along and downstream the table structure. A velocity profile is composed by more than fifteen measurement locations. These



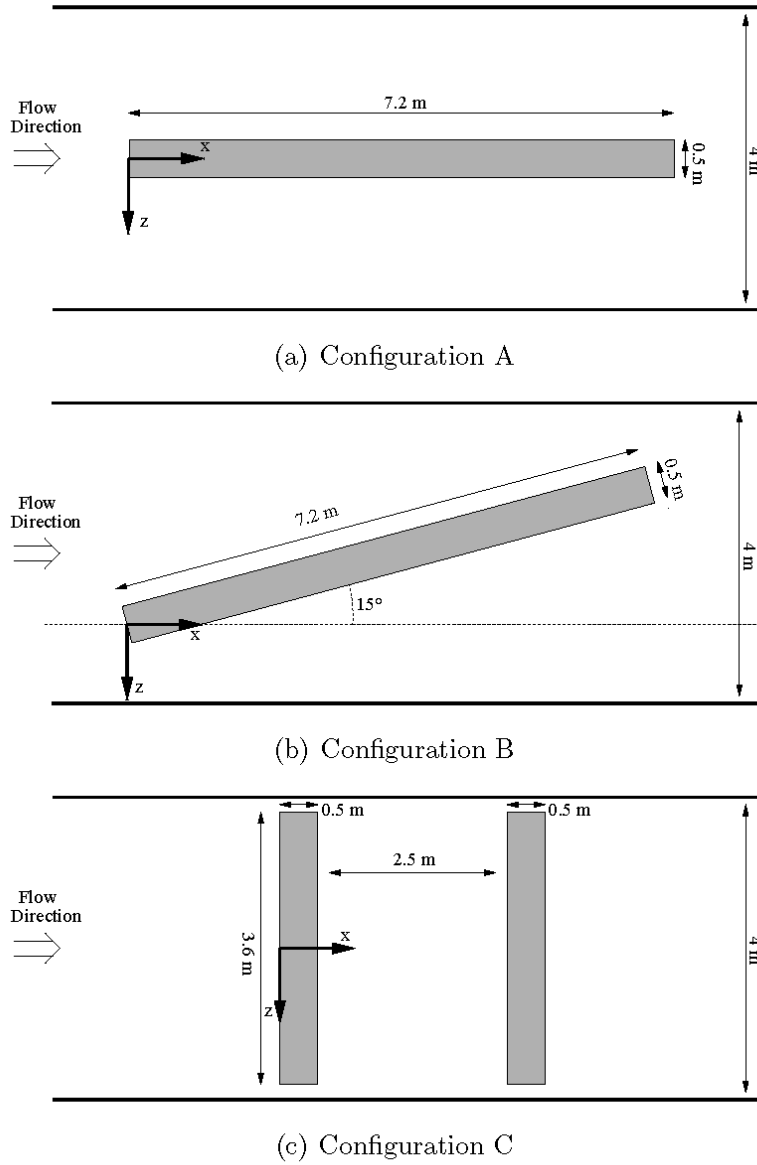


Figure 4: Presentation of the configurations used in the tank from which flow measurements were made (top views)

points are presented on the figure 5 for the configuration A. The velocity is measured using a 2D Laser Doppler Velocimetry system (LDV), on the plane  $Z = 0$  m and  $Z = 0.30$  m.

LDV velocities along the monitoring profiles are interpolated in order to

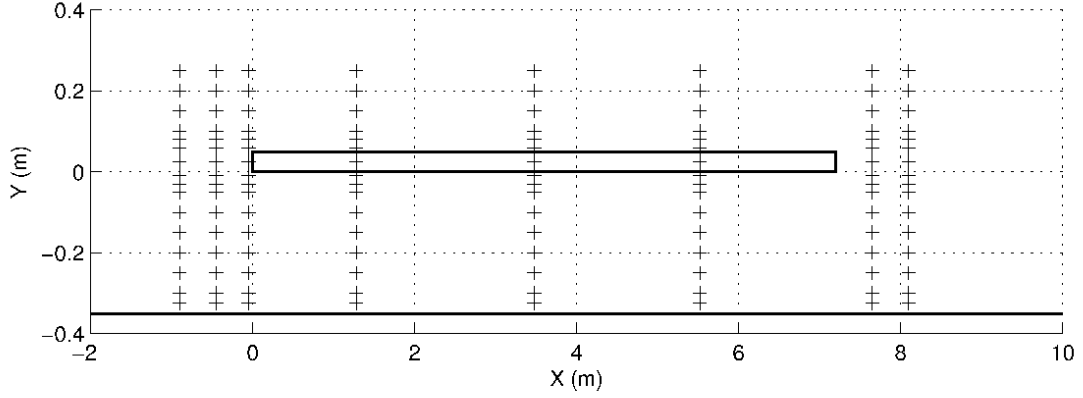


Figure 5: Experimental points of velocity measurements for the configuration A in the plane  $Z = 0$  m

generate 2D velocity maps for the plans  $xOy$  and  $xOz$ . The extrapolation between two profiles was compared and validated from PIV results in a previous work [11].

In each measurement location, the velocity is acquired during 100 s. For four different profiles, the time of acquisition is extended to 420 s in order to access to the shear stresses with more accuracy. In fact, this data acquisition time is long enough to get convergence on the calculation of the shear stresses [10].

Shear stresses are calculated using the Reynolds shear stress method, also defined as the covariance method:

$$\tau = \rho \overline{u'v'} \quad (1)$$

where  $u'$  and  $v'$  are the velocity fluctuations along the horizontal  $Ox$  and vertical  $Oy$  axis respectively and  $\rho$  is the water density.

An other parameter studied in this paper is the Turbulent Kinetic Energy (TKE) quantified here by the mean of the turbulence normal stresses:

$$k = \frac{1}{2} \left( \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (2)$$

where  $w'$  is the velocity fluctuations along the transverse  $Oz$  axis.

## 2.2. Results

Results of the configuration A highlight important areas of velocity decrease, under and next to the table (figure 6) [11, 10]. In terms of sediment

transport, it involves a decrease of the sediment transport rate and preferential areas of silting up whose location depends on the orientation of the table towards the main flow direction.

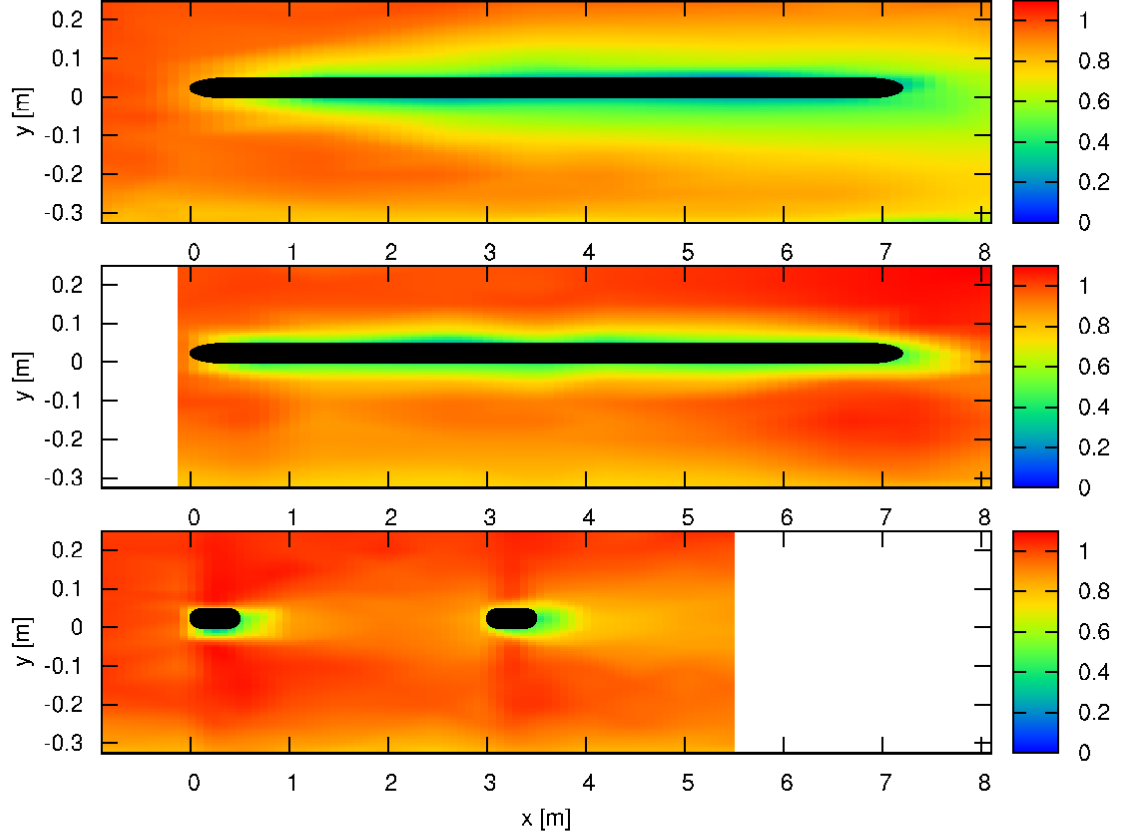


Figure 6: Normalized longitudinal velocities on the median vertical plane of the tables for the configurations A (top), B (middle) and C (bottom). Dotted lines stand for LDV measurement locations.

Moreover, in configuration B, modifications of the flow direction under the oyster table is underlined close to the bottom, which confirms the *in-situ* measurements carried out in the Mont Saint-Michel Bay [9].

Shear stresses measurements reveal that there is no consistent modification on the bottom in these two configurations, *i.e.* no direct impact on the bottom sediment but there is an increase of the total shear stress which leads to energy dissipation by turbulence. This energy dissipation involves an overall flow decrease, and in turn modifications of sediment transport patterns at a greater spatial scale.

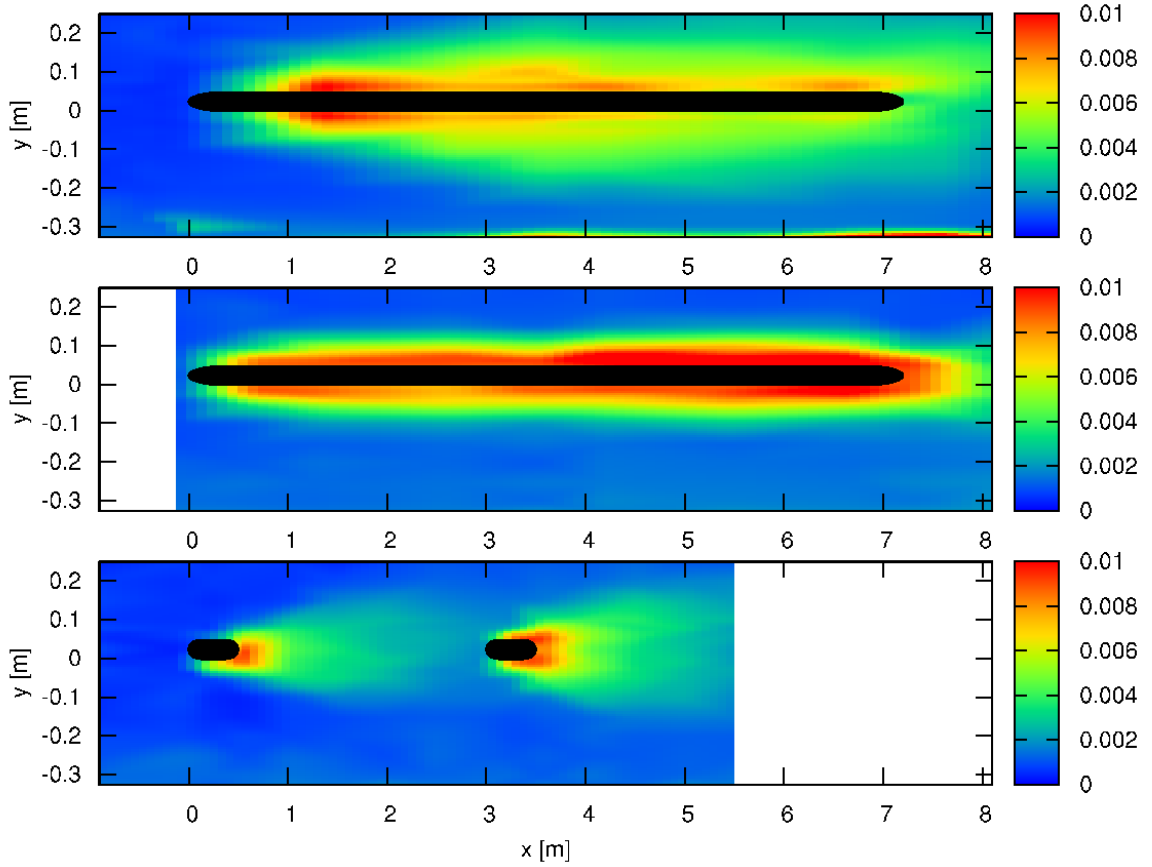


Figure 7: Turbulent Kinetic Energy ( $m^2/s^2$ ) on the median vertical plane of the tables for the configurations A (top), B (middle) and C (bottom). Dotted lines stand for LDV measurement locations.

As for configuration C, the developments of table-induced boundary layers are quite similar behind both tables, except a slight masking effect between the two tables (figure 6). This masking effect leads to a faster increase and a more important vertical extension of the velocity decrease area behind the second table. This area representing the wake of the tables exhibits local deceleration up to 20 % of the upstream velocity.

The bottom boundary layer seems to be slightly affected when the flow is passing through both tables. This local phenomena might be due to the observed acceleration area (in red) located just under the tables, which is an area of interest since the oysters biodeposits can be directly advected from under the tables by this faster velocity.

The TKE distribution around the overall table is shown on figure 7 for

configurations A, B and C. For each configuration, table-induced TKE does not propagate to the bed. The table presence impacts a part of the water column and the inherent suspended particles processes, like flocculation or fragmentation, but not directly the bottom processes, like sediment erosion or deposition.

Figure 6 shows that there is no modification of the bottom shear stress after the first and the second table. But the shear stress on the whole water column, considered as the sum of the bottom, the lower and the upper table shear stresses [10], is multiplied by 25 just downstream from the first table and by 35 when the flow is going through the second one. The same conclusions can be drawn about energy dissipation. The effect of the succession of tables is an increase of the total shear stress and hence of energy dissipation.

Moreover, a “break point” appears, just downstream from the second table, which characterizes a large velocity decrease (an attenuation of 50%) and a small value of shear stress (0.4 Pa).

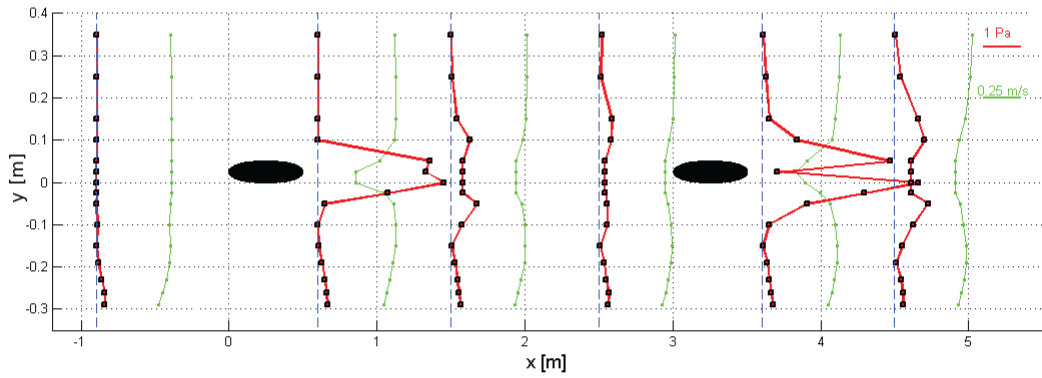


Figure 8: Reynolds shear stresses (red lines) and longitudinal velocities (green lines) on the median vertical plane across two 3.60 m tables, configuration C

Through all these experimental campaigns, the impact of an oyster table on the flow has been investigated and is well understood. But, due to the restrictions made for the experimental modeling (reduction of the table length, limitation to one or two tables), it is difficult to extend these results to an *in-situ* consideration. A numerical tool, calibrated from these experimental results, is now presented in order to reach more realistic table lengths and to model the impact of a whole oyster farm on the flow.

### 3. Numerical model

All the numerical work is done using the 3D Computational Fluid Dynamics commercial code Ansys Fluent<sup>TM</sup>. This software allows to compute flow characteristics (flow velocity and turbulence quantities) dynamically in time or with a steady method over a spatial grid. It is based on a finite-difference solution of the Navier-Stokes equation with, in our case, a Shear Stress Transport (SST)  $k - \omega$  turbulence closure scheme.

The method used to model the oyster table is first presented before to be validated from the experimental data.

#### 3.1. The modeling method

Oyster bags are a complex obstacle to the flow. The size and the shape of the oysters inside the bags are all different. In addition, they are randomly distributed. Moreover, the bags are a porous media which also needs to be finely represented. Then, it is difficult to simulate precisely the bags with oysters inside, so they have to be approached by a model. We have made the choice to use Ansys Fluent<sup>TM</sup> with which it is possible to consider a roughness approach and a porous one. These two approaches should normally be take into account for the simulation of the real physical configuration. Unfortunately, a numerical model using rough and porous approaches simultaneously is very expensive in term of cells number and computational time. So, we choose to compare each approach taken individually:

1. a “realistic” table for which oyster bags geometry is physically modeled. A roughness law based on a physical roughness length and a dimensionless roughness constant is used in the near wall region of the bags.
2. a “simplified” table which consists of a flat horizontal plan-parallel body, considered as a porous media and modeled by the addition of a momentum source term to the standard fluid flow equations.

The source term is composed by a viscous loss term, Darcy’s law [4], and an inertial loss term, Forchheimer’s correction term for non-laminar flows [6].

Results obtained with the first approach are not significantly convenient. Only the geometry of the bags is considered, due to the complexity of the structure (oysters and bags). So, without any flow interaction effects inside the oyster bags (figure 9), the numerical simulations give relatively poor



results: the velocity deficits are under-estimated with a relatively high differences until 30 %.

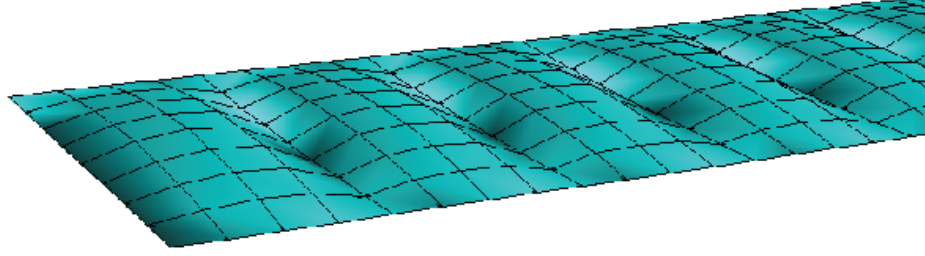


Figure 9: Numerical shape of the rough oysters bags

The second approach is to consider the oyster table as three simplified porous regions: one for the oysters bags and two others in order to take into account the legs of the table (figure 10).

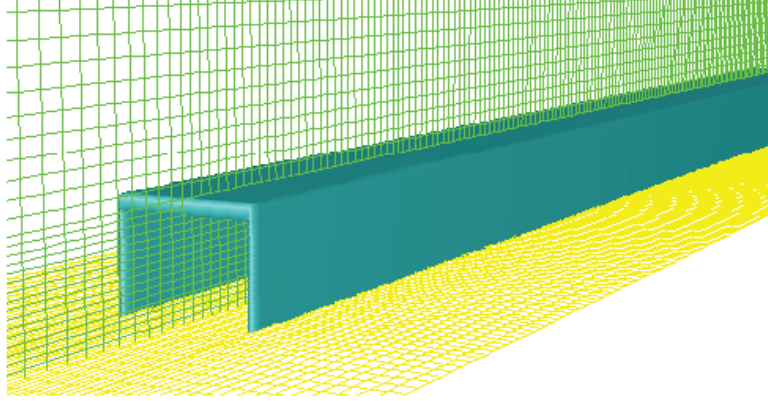


Figure 10: Mesh around the "simplified" oyster table with the porous legs

Porous media are modeled in Ansys Fluent<sup>TM</sup> by the addition of a momentum source term (equation 3) to the standard fluid flow equations, composed of two parts: a viscous loss term and an inertial loss term as expressed by the following equation:

$$S_i = - \left( \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} |v_i| v_i \right) \quad (3)$$

where  $S_i$  is the source term for the  $i$ th momentum equation,  $\mu$  is the dynamic viscosity,  $|v_i|$  is the velocity magnitude,  $\alpha$  is the permeability and

$C_2$  is the inertial resistance factor. This momentum sink contributes to the pressure gradient in the porous cell, creating a pressure drop that is proportional to the fluid velocity (or squared velocity) in the cell. The model solves the standard conservation equations for turbulence quantities in the porous medium. In this approach, turbulence in the medium is treated as though the medium has no effect on the turbulence generation or dissipation rates [5, 17].

Real table legs are vertical cylinders of 35 mm height and 8 mm diameter spaced by 60 cm. A 7.20 m table has 12 legs on each side. But due to the difference of scale between the size of the table and the diameter of the legs, it would be difficult and very expensive in terms of cells to properly mesh the legs. The solution proposed here is to simplify the mesh of the legs by simply modeling them as two porous vertical parallelograms with a 8 mm thickness (figure 10). The coefficients used for the modeling of the legs are given in the table 1, as well as those used for the bags of the oysters.

Table 1: Permeability and inertial resistance factor chosen for the oyster bags and table legs along each axis

Axe	oysters bags		table legs	
	$1/\alpha$	$C_2$	$1/\alpha$	$C_2$
X	4	10 000	4	0
Y	0	1 000 000	0	0
Z	4	10 000	0	0

The porous coefficients for the table legs are null for the  $Oy$  and  $Oz$  direction because, according to the experimental results (figure 6), the legs seem to have no influence on the configuration C: it is the alignment effect of the legs in the flow direction which contributes to enlarge the wake under the table in the configuration A.

### 3.2. The modeling scheme

The calculation of the Reynolds number of the flow around the experimental model of the oyster table clearly shows that the numerical model needs a turbulence closure scheme:

$$Re = \frac{U L}{\nu} = \frac{0.5 \times 7.2}{1.10^{-6}} = 3.6.10^6 \quad (4)$$

In order to study the boundary layers development and the flow in the wake of the table, the SST  $k - \omega$  model [13] is selected. This accurate and robust model has the same form as the classical  $k - \omega$  model with two transport equations for the turbulent kinetic energy  $k$  and the specific dissipation rate  $\omega$ . The two major ways in which the SST model differs from the classical model are: 1) a gradual change from the standard  $k - \omega$  model in the inner region of the boundary layer to a high Reynolds number version of the  $k - \varepsilon$  model in the outer part of the boundary layer and 2) a modified turbulent viscosity formulation to account for the transport effects of the principal turbulent shear stress.

The steady segregated solver is used to solve the SST  $k - \omega$  model. In the segregated algorithm the governing equation is solved sequentially, so the solution loop must be carried out iteratively in order to obtain a converged numerical solution. This solver solution based on the pressure is adapted to low speed flows [1]. The second-order upwind discretization scheme is chosen: it requires longer calculation times than the first order one but is more robust. The Semi-Implicit Method for the Pressure-Linked Equation (SIMPLE) is chosen for the pressure-velocity coupling method.

The calculation is here considered as converged when every scaled residuals are lower than  $1.10^{-4}$ .

### 3.3. Computational grid

A three dimensions numerical flume tank is considered, in order to simulate the experimental conditions. The total height of the domain is two meters and the width is four meters. The length of the numerical tank is 11.20 m: 2 m upstream, 2 m downstream from the 7.20 m table.

A roughness effect is considered on the bottom wall to reproduce the evolution of the bottom boundary layer along the domain. This effect modifies the law-of-the-wall function near the boundary: the slope is the same but it changes the intercept by adding a constant in the log-law depending on the type and on the size of the roughness.

The relatively short upstream distance of 2 m before the table is only possible by introducing a velocity profile in the inlet boundary condition. This profile is extracted from the experimental data and reproduce the bottom boundary layer observed in the tank at that point. Without this inlet velocity profile, a length of around 10 m long upstream from the table should be needed to simulate correctly the full development of the bottom boundary layer.

For the configuration A, since only half of the flume tank is modeled thanks to a symmetry artifice, the width is only two meters (figure 11).

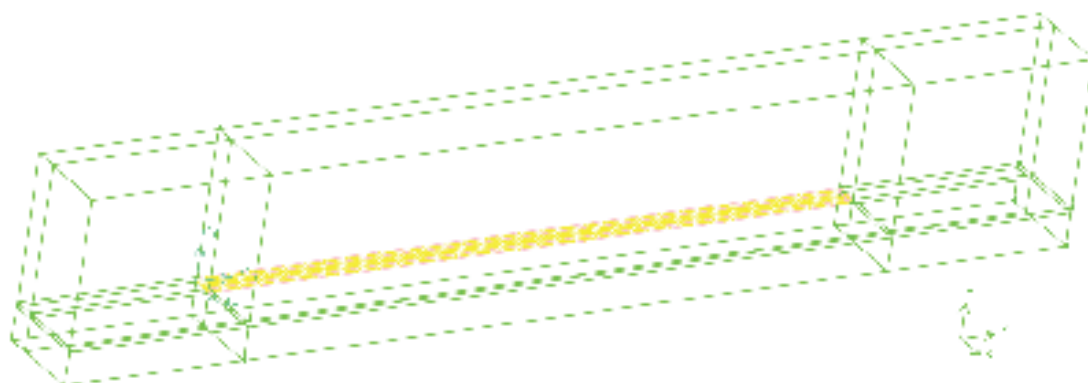


Figure 11: View of the half numerical tank (configuration A), due to symmetry plan. The yellow part is the half table.

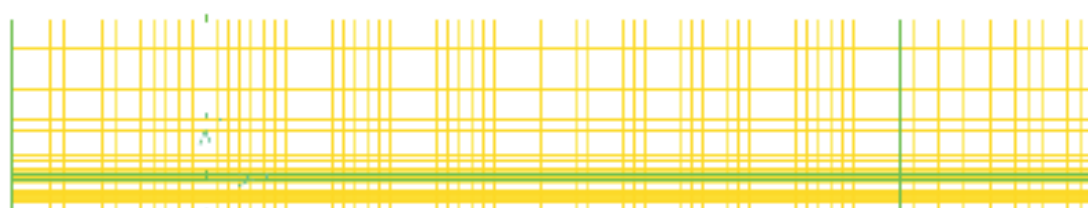


Figure 12: Side view and cells distribution of the numerical domain

The meshing scheme used to model the domain is mapped mesh since it results in a more structured mesh than with tetrahedral elements (figure 12). The domain is divided into 18 sub-domains (figure 11) in order to refine the cell size in the near-wall regions, close to the table and the bottom. Actually, these areas contain high velocity gradients and require a more refined mesh. Moreover, the division in several domains reduces the mesh skewness and allows a better global homogenization of the mesh size.

The size of the first cell depends on the roughness parameter. It is not physically meaningful to have a mesh size such that the wall-adjacent cell is smaller than the roughness height. A comparison of many velocity profiles and experimental data for different first mesh sizes shows that the domain has to be refined especially between the bottom and the lower surface of the table in the vertical direction. The upper surface of the table is less dependent on the first cell size. This is explained by the fact that the bottom is a wall

which required to be finely meshed for the development of the boundary layer, whereas the table is a porous media.

To check the effect of the cells size along the bottom wall, and so of the global number of cells of the domain, the dimensionless parameter  $y^+$  is used. This parameter is defined with the following equation:

$$y^+ = \frac{\rho u^* d}{\mu} \quad (5)$$

with  $\rho$  the density,  $u^*$  the friction velocity,  $d$  the wall distance in the normal direction of the wall boundary and  $\mu$  the viscosity.

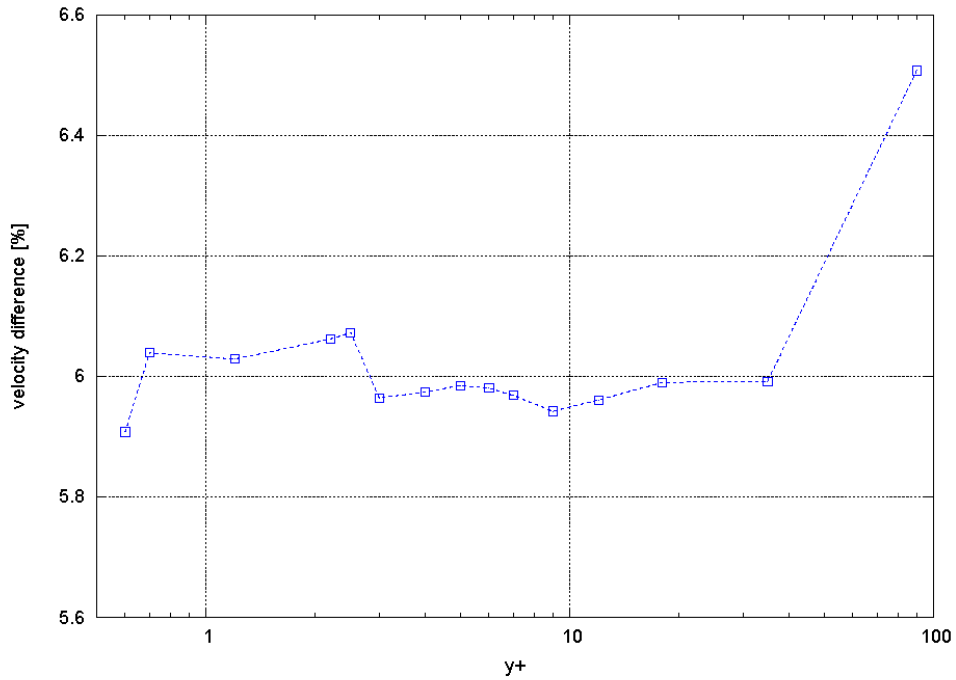


Figure 13: Mean difference of velocity along the vertical profiles, for the configuration A, between experimental and numerical data for different meshes with various  $y^+$  values

Results of this comparison are shown on the figure 13. There is not a large difference between all the tested cases, except for the highest  $y^+$  values ( $y^+ \geq 40$ ). Finally, the value  $y^+ = 20$  is chosen because of the good agreement with the experimental velocities and the reasonable number of cells.

The length of the cells (in the flow direction) has also been tested: from 720 to 8 cells along the table. The results show that the mean differences

between experimental and numerical velocities vary from 5.9 to 6.3 % on 5 different profiles along the table. So, the mesh with 120 cells along the table is kept because of the good compromise between the mesh quality and the calculation time.

According to these choices, the three dimensional numerical domain contains 205 000 cells. This relatively small number of cells permit to run the numerical model on a classical Personal Computer with a computational time of about 20 minutes for a steady case.

### 3.4. Results and validation

Figures 14, 15 and 16 show the numerical results along the table and on the wake for the configuration A, B and C respectively. The comparison with the experimental data is shown on these figures in terms of reduced velocity, which is the ratio between the velocity at the considered point and the far upstream velocity  $V_{inf} = 0.5 \text{ m.s}^{-1}$ . The difference  $\Delta V$  expressed in % on these figure is the ratio between the difference of velocities (experimental  $V_{exp}$  and numerical  $V_{num}$ ) and the experimental velocity for the considered point:

$$\Delta V = \frac{V_{exp} - V_{num}}{V_{exp}} \quad (6)$$

For the configuration A (figure 14), the numerical velocities are in quite good agreement with the experimental ones, as well as in the center of the table ( $z = 0 \text{ m}$ ) or at 5 cm from the side of the table ( $z = 0.30 \text{ m}$ ).

Some differences appear, especially around the table. Under the table, for  $z = 0 \text{ m}$  and  $x = 3.48 \text{ m}$ , the numerical velocities are around 15% higher than the experimental ones. On the contrary, above the table, for  $z = 0 \text{ m}$  and  $x = 7.65 \text{ m}$ , the numerical velocities are around 15% lower than the experimental ones. But these differences are localized and do not affect a global profile. They are, all around the table, lower or equal to 15%. Near the table the differences could be highest, like for  $z = 0 \text{ m}$  and  $x = 3.48 \text{ m}$  at  $y = -0.05 \text{ m}$ , whereas the numerical velocities are as closed as the ones at  $y = -0.2 \text{ m}$  to the experimental ones. Actually, the difference between the numerical and experimental velocity is quite constant for these two points, but the experimental velocity is lower at  $y = -0.05 \text{ m}$  so  $\Delta$  is higher than at  $y = -0.2 \text{ m}$ .

The mean velocity difference for this configuration is 5.99 %.



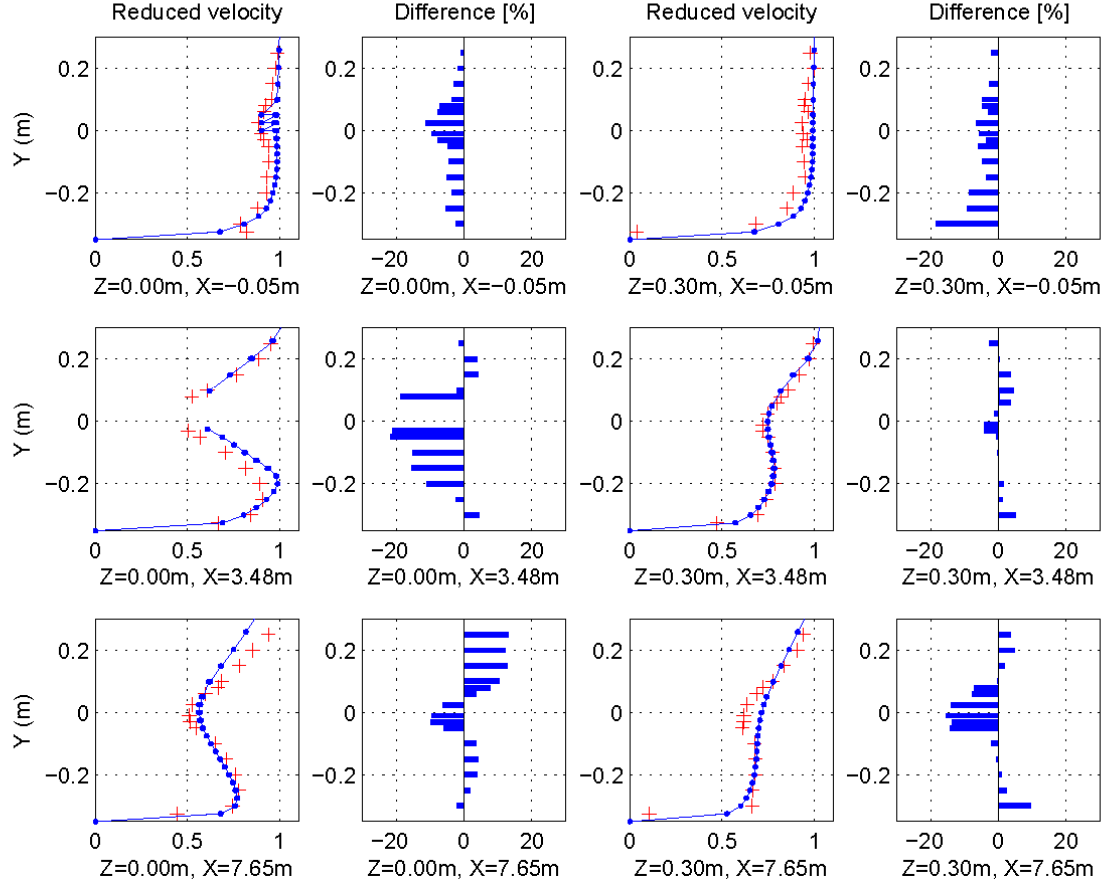


Figure 14: Comparison of the reduced velocity profiles for the numerical table and experimental results obtained for the configuration A, at  $Z = 0$  m (left) and  $Z = 0.30$  m (right) and  $X = [-0.05 ; 3.48 ; 7.65]$  m. On the left: reduced velocity profiles (red crosses: experimental results, blue lines and points: numerical results), on the right: difference (%).

It is also interesting to compare the profiles between them. At the middle of the table ( $z = 0$  m) the development of the wake of the table is symmetric: it increases at the same rate under or above the table. The boundary layer of the bottom wall rises also from the beginning of the domain and all along it and reaches the wake of the table between  $x = 3.48$  m and  $x = 7.65$  m.

On the side of the table ( $z = 0.30$  m), it is interesting to notice that the velocity deficit under the table is higher than the one under the middle of the table. For example, at  $x = 3.48$  m and  $y = -0.2$  m, the velocity reaches 75 % for  $z = 0.30$  m whereas it remains at quite 100 % for  $z = 0$  m. This is

the same at  $x = 7.65$  m. This difference between under the middle and the side of the table is especially due to the legs [11].

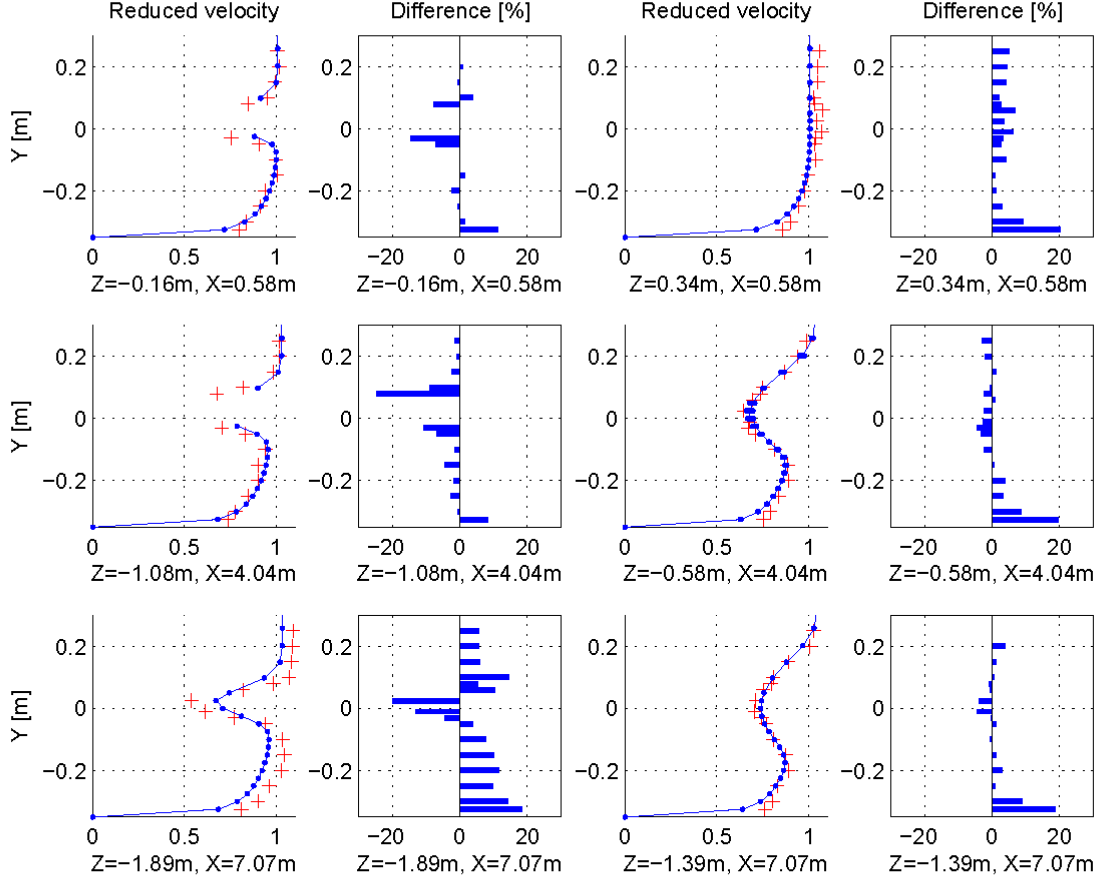


Figure 15: Comparison of the reduced velocity profiles for the numerical table and experimental results obtained for the configuration B, at  $Z = [-0.16 ; -1.08 ; -1.89]$  m (left) and  $Z = [0.34 ; -0.58 ; -1.39]$  m (right) for  $X = [0.58 ; 4.04 ; 7.07]$  m. On the left: reduced velocity profiles (red crosses: experimental results, blue lines and points: numerical results), on the right: difference (%).

For the configuration B (figure 15), the comparisons are quite similar to the configuration A. The differences between the numerical and experimental results are quite low for every presented profiles. They are always lower or equal to 5 %, except for the profile at  $z = -1.89$  m where the numerical velocities are under-estimated all along the profile of around 10 %. Once again, the differences are, for most of the profiles, a little bit higher near the bottom wall and just under or above the table, and could reach 20 %.

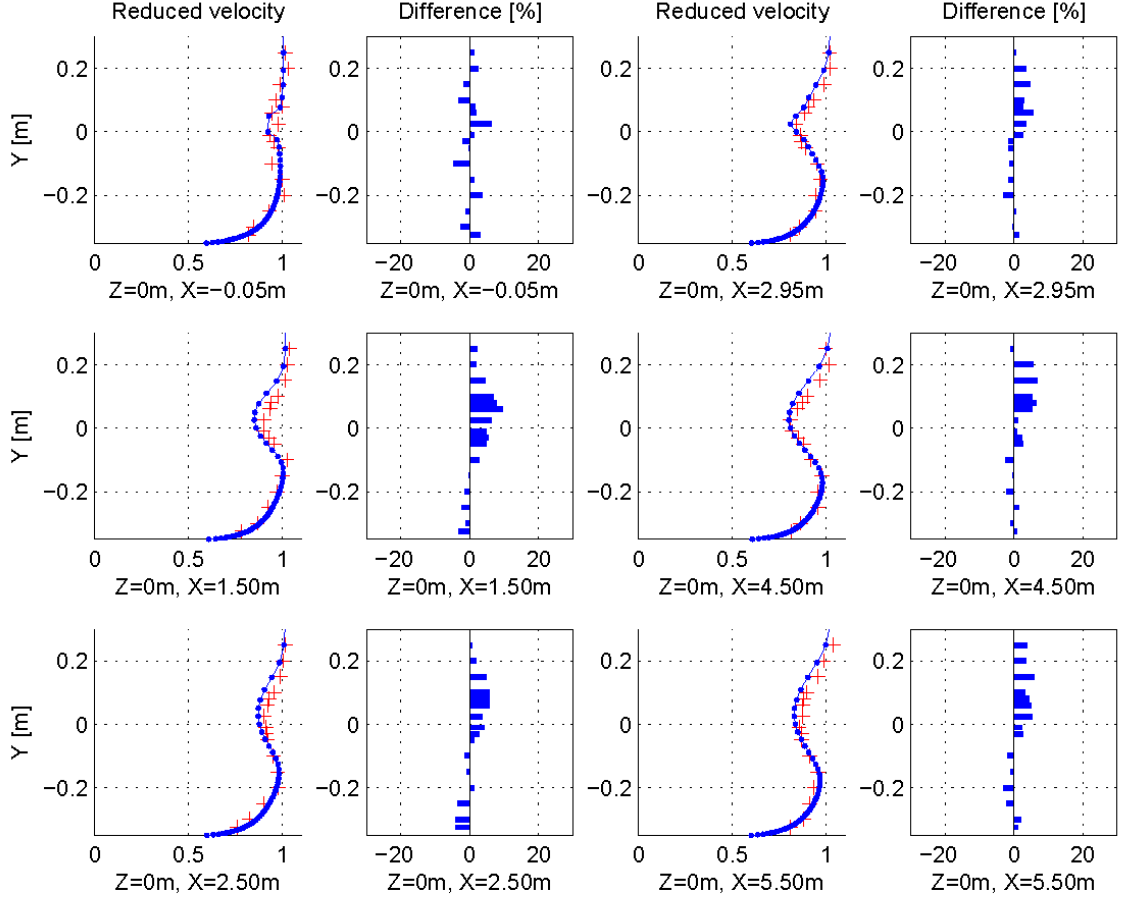


Figure 16: Comparison of the reduced velocity profiles for the numerical table and experimental results obtained for the configuration C, at  $Z = 0$  m and for  $X = [-0.05 ; 1.50 ; 2.50 ; 2.95 ; 4.50 ; 5.50]$  m. On the left: reduced velocity profiles (red crosses: experimental results, blue lines and points: numerical results), on the right: difference (%).

The evolution of the profiles in the configuration B is different from the configuration A. Actually, the wake in the middle of the table ( $z = -0.16, -1.08$  and  $-1.89$  m) is clearly smaller and less developed than for the previous configuration. These three profiles are quite similar with an evolution versus the vertical axis which is the same, excepted for the amplitude of the velocity which is a little bit lower at  $x = 4.04$  m for the experimental data. This similarity of the vertical profiles comes from the angle of  $15^\circ$  of the table, which makes that all the length of the table is now a leading edge for the flow.

On the side of the table ( $z = 0.34, -0.58$  and  $-1.39$  m, figure 15), excepted

the first profile ( $x = 0.58$  m) which is not in the wake, the velocity deficit is also quite the same for  $x = -4.04$  m and  $x = 7.07$  m. The last profile ( $x = 7.07$  m) is a little bit larger than the one at  $x = 4.04$  m, but the amplitude of the deficit is constant around 40 %, just at the level of the table ( $y = 0.05$  m). Contrary to the configuration A, where the wake of the legs is noticeable between the bottom wall and the table on the side ( $z = 0.30$  m and  $x = 7.65$  m, figure 14) with a velocity deficit around 40 % at  $y = -0.2$  m, it is not clearly the case here. The velocity deficit reaches only 20 % at  $z = -1.39$  m and  $x = 7.07$  m for the same altitude. This remark confirms first, that this is especially the alignment of the legs with the flow which create the wake and then, the choice of the porous factors for the legs only in the  $Ox$  direction.

For the configuration C, the numerical velocities are in good agreement with the experimental ones. Differences are everywhere lower than 10 %. The maximum of difference is reached in the wake behind or just above the table, for  $y$  between 0 and 0.2 m, for example at  $x = 1.50$  m or  $x = 4.50$  m. Except these places, differences are lower than 5 %.

For this last configuration, it is interesting to compare the wake development behind the first and the second table (first and third column of the figure 16). Between the wall bottom and the tables ( $-0.35$  m  $< y < 0$  m), there is no significant difference. The slope of the boundary layer is the same and the velocity deficit is comparable for a given distance behind the first or the second table. This is not the case for  $y > 0$  m. Actually, the wake is a little bit larger and higher behind the second table, with a velocity deficit amplitude more pronounced. So, a slight wake interaction is noticeable for this distance between both the tables.

In this configuration C, the legs do not have any influence on the wake. The velocity deficit at  $y = -0.2$  m is quite null for every profiles, that means that the velocity between the wall bottom and the table reaches the far upstream velocity, instead of the boundary layer on the bottom and under the table.

Figure 17 shows the Turbulent Kinetic Energy for the 7.20 m table on the median vertical plane and for the configurations A, B and C.

These maps of TKE could be compared with the experimental ones presented in figure 7. For the configuration A, it is clear that the numerical TKE shows a large development above the table, with high values around  $7.10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>. It is also the case for the experimental TKE, but with values a

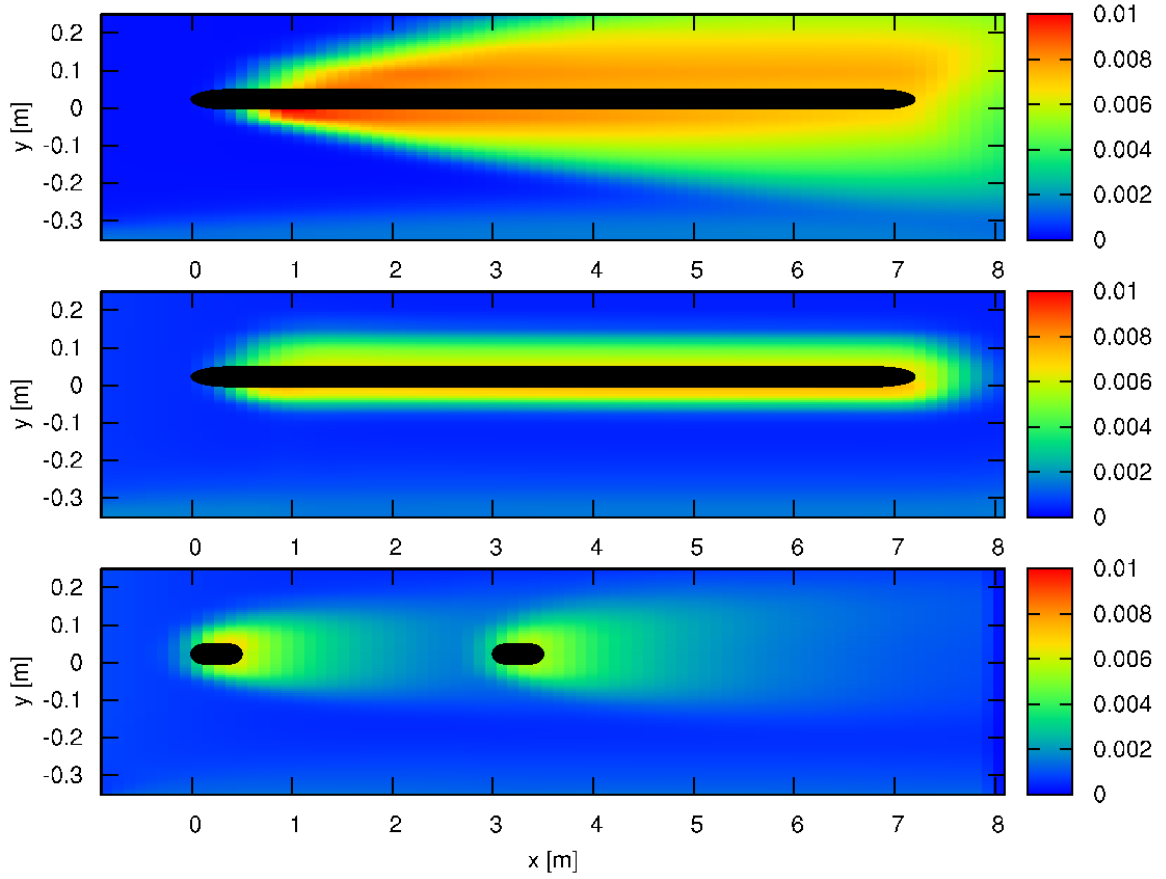


Figure 17: Turbulent Kinetic Energy ( $m^2/s^2$ ) on the median vertical plane for experimental tables in the configurations A (top), B (middle) and C (bottom)

little bit lower and around  $5.10^{-3} m^2/s^2$ . For the configuration B, the distribution of the highest values are all around the table but the amplitudes are larger with the experimental data ( $\simeq 9.10^{-3} m^2/s^2$ ) than with the numerical ones ( $\simeq 7.10^{-3} m^2/s^2$ ). This is also the case for the configuration C, where the experimental TKE shows a larger intensity ( $\simeq 7.10^{-3} m^2/s^2$ ) than the numerical one ( $\simeq 5.10^{-3} m^2/s^2$ ). It is also clear that the patch of high values of TKE is larger for the second table than for the first one, especially above the table, in both the experimental and numerical data.

From all these results, we can consider that the numerical model is calibrated and validated thanks to the experimental data based on a 7.20 m long table. However, in common oyster farms, the tables are about 100 m long and are often grouped. But there is no experimental or *in-situ* measurement

of the velocity around an oyster table like it is done in this paper for the 7.20 m table. So, results presented in the next section represent a first step in the numerical modeling of real oyster tables and must be carefully considered.

## 4. Real length table modeling

### 4.1. Extension of the model

In order to reproduce realistic lengths encountered in the field, the model has to be extended. For that purpose, Ansys Fluent<sup>TM</sup> provides a tool to scale the numerical domain. Thanks to that tool it is not necessary to create a new mesh each time the oyster table size is changing. A scale factor could be defined in each direction: the domain is extended or compressed without modification of the number of cells. This tool has to be used with caution, since it changes the aspect ratios of the cells in the mesh, even if the simplified mesh with porous bags and legs proposed in the previous section is appropriate to the scale factor because it can be extended easily without geometry modifications.

To check the effect of the scale factor on the results, two meshes are studied. Comparisons are made between the results obtained with the mesh of the 7.20 m porous table scaled with a scale factor of ten in flow direction (205 000 cells) and a mesh of 72 m long table drawn with the same distribution and size of cells than the 7.20 m long table mesh (1 663 000 cells). Several velocity profiles are compared along the two tables. Figure 18 shows these velocity comparisons.

These profiles are in good agreement all along the tables. Only a little gap is noticeable for the first profiles ( $X = 10.29$  m) under the table. This good agreement comes from the large length of the table and because the flow is in-line with the table and has a low turbulence intensity (5 %). So, with these results, it seems that the scale factor is usable in this configuration.

So, for a real size 100 m long table, the mesh of a 10 m long table is done with the same cell sizes described in the previous section. Then a scale factor of 10 is applied in the flow direction. The velocity of the full-scale table is  $0.7 \text{ m.s}^{-1}$  and the boundary layers are similar to those of the 1/2 scale table.

Figure 19 investigates the velocity profiles along a full-scale 100 m long table in the configuration aligned with the flow. The evolution of the velocities is quite different from the one along the 1/2 scale 7.20 m long table.

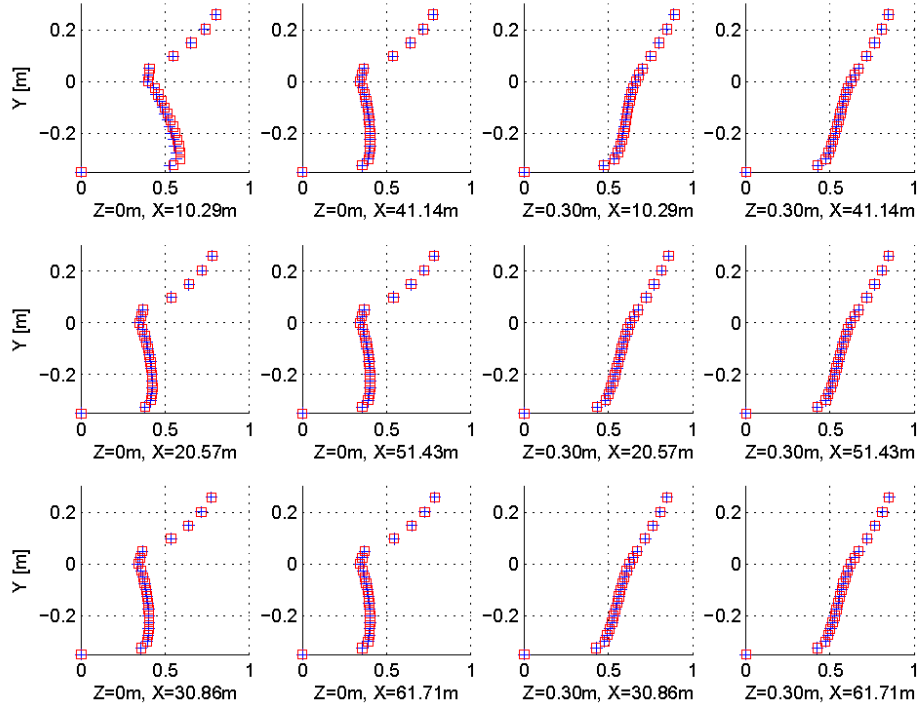


Figure 18: Comparison between numerical velocity profiles for an extended table of  $10 \times 7.20$  m long table (blue crosses) and 72 m long table (red squares)

Indeed, the wake is growing fast during the first 20 m then stabilizing for the rest of the table. On the figure 18, from  $X = 20.57$  m, every velocity profiles presented are similar. Under the table, both the boundary layers of the bottom and of the table are joining together from about 30 m. After that, there is no more evolution in the vertical wake, which is fully developed.

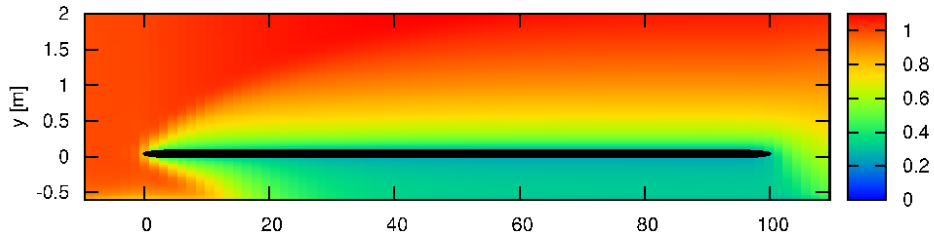


Figure 19: Vertical maps of the reduced longitudinal velocity in the configuration aligned with the flow for a full-scale 100 m long table in the plane  $z = 0$  m (center of the table)



The bottom shear stress extracted from this simulation is essential in order to understand the modifications of the sediment dynamics inherent to the presence of the oyster table. As shown in the figure 20(a), it permits to plan the area where silting up can occur around a table in this configuration.

Depending on the type of sediment located in the area and so, on the critical shear stress value for erosion, sediment could be put in suspension for the highest shear stresses. According to [12], the critical shear stress is strongly dependent on the volume fraction of mud and clay on the sediment, but can vary between 0.2 Pa and 2 Pa. So, silting up appears when the shear stress is under this critical shear stress value. And in this case, figure 20(a) points out a possible silting up under and behind the table, with shear stresses under 0.2 Pa, like what happens in the Baie des Veys, France (figure 20(b)). The bottom shear stress is the lowest in the middle of the table and from  $X \simeq 40$  m, with values under 0.1 Pa, when the wakes of the two legs alignments and the table is fully developed and merged.

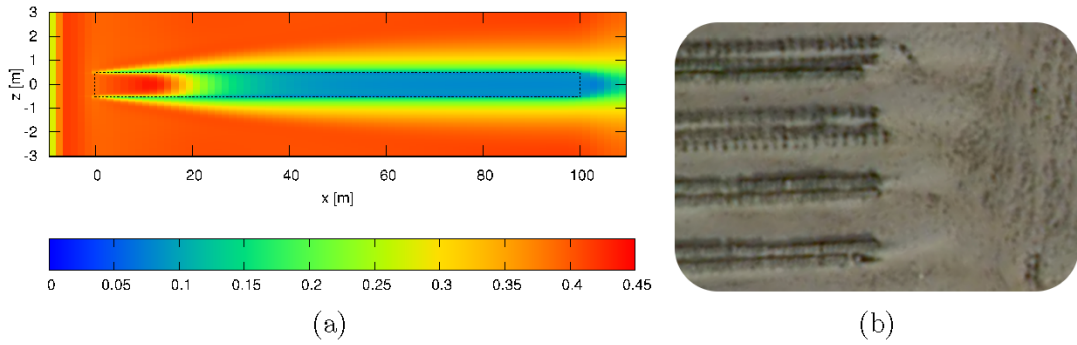


Figure 20: Contours of bottom shear stress (Pa) under a 100 m long table (a) and top photography of oyster tables in the Baie des Veys, France (b).

In an oyster farm, tables are often grouped by two (figure 20(b)), three or four with a space between each groups wide enough for farm vehicles. Without modeling a complete oyster farm, numerical simulations of four tables grouped by two and spaced by 5 m give a good outline of the impact of many tables at a larger scale. The magnitude of the flow is always 0.7 m/s and tables are put in the same direction than the flow. Results, in term of reduced velocities, are shown in the figure 21.

In this configuration, there is no wake interaction between two rows of tables. The distance between them seems to be too large. The wake is growing

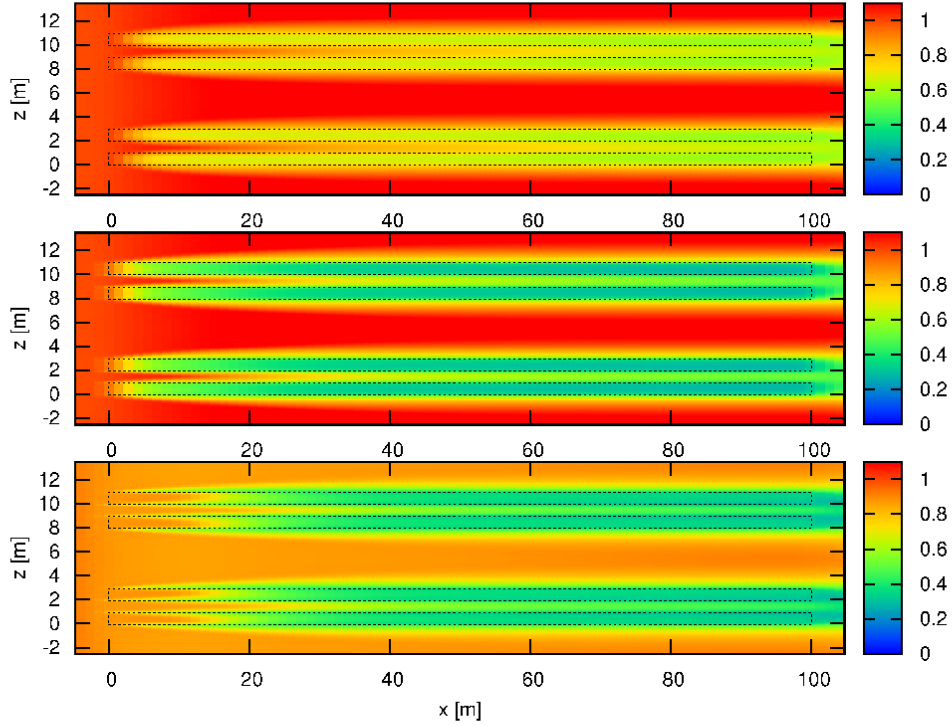


Figure 21: Horizontal maps of the normalized longitudinal velocity around four tables aligned with the mean flow direction, at  $y = 0.3$  m,  $y = -0.1$  and  $y = -0.6$  m from the top to the bottom

larger in the vertical direction than in the horizontal direction. However, two tables in a row are so close compared to their length that their wakes join together at  $X \simeq 30$  m between the bottom wall and the table, at  $X \simeq 50$  m just under the table and  $X \simeq 90$  m above the table. Once again, the wake is quicker and larger developed under the table. This wake joining induces low velocities, less than 40 % of the far upstream velocity, near the bottom and along half the length of the table.

For the configuration at  $15^\circ$  (figure 22), the decrease of the velocities is not so pronounced: it reaches only 20 % in the flow and 40 % along the bottom. But the wake is growing on the sides and interaction appears between two tables of the same row but also between two rows.

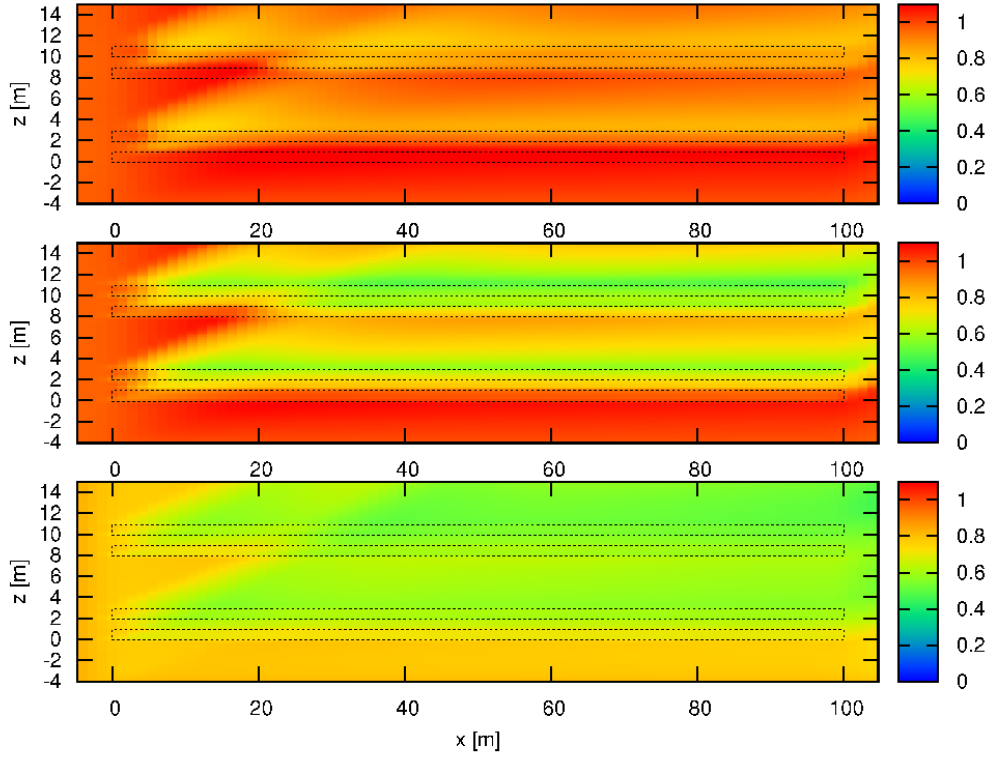


Figure 22: Horizontal maps of normalized longitudinal velocity around four tables with an angle between the mean flow direction and the tables' direction of  $15^\circ$ , at  $y = 0.3$  m,  $y = -0.1$  and  $y = -0.6$  m from the top to the bottom

## 5. Conclusion

Comparisons between several modeling configurations of an oyster table in the flow and experimental results have been investigated. The porous model presented here with the addition of the porous legs is in good agreement with the experimental results obtained in the tank at a scale of 1 to 2 and for a 7.20 m long table. The extension of this model to a real size of oyster tables allows the investigation of the hydrodynamic behavior of the flow around one or a small number of tables at a scale of 1 to 1. Interactions between the wakes of the tables and bottom shear stresses are now numerically reachable for a part of an oyster farm in different configurations of incidence of the mean flow.

This way of modeling is a promising approach since it could be extended again to a largest size in order to model a whole oyster farm. But this model needs to be compared with *in-situ* hydrodynamics data before adding

sediment dynamics in order to reproduce silting effects.

The impact of the waves should also be accounted for in order to improve the model. Anyway, the modeling of an entire oyster farm can now be considered and could provide an help to decide the best configuration in order to limit the siltation phenomenon.

Velocity and turbulence fields obtained by this kind of modeling could also be putted into wide-extension hydrodynamic coastal models in order to reproduce the effects of an oyster farm on hydrodynamics and sediment dynamics at the scale of a bay. The first steps are presented in [8].

## 6. Acknowledgments

The authors would like to acknowledge Jean-Valery Facq for the experimental device development and data acquisition, Mathieu Brevers for the first steps of the numerical work and Région Basse-Normandie for the financial support of the PhD work.

## References

- [1] *FLUENT 6 User's guide, Volume 1 - 5*, fluent europe ltd edition, December 2001.
- [2] S. Bahé. Conchyliculture et dynamique morpho-sédimentaire en baie du mont saint-michel. Master's thesis, EPHE, 2003.
- [3] F. Cayocca, P. Bassoulet, P. Le Hir, H. Jestin, and P. Cann. Sedimentary processes in a shellfish farming environment, mont saint-michel bay, france. In *INTERCOH*, pages 431–446. Sediment and ecohydraulics, 2005.
- [4] H. Darcy. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Dalmont, Paris, 1856.
- [5] A. Erriguible, P. Bernada, F. Couture, and M. Roques. Simulation of convective drying of a porous medium with boundary conditions provided by cfd. *Chemical Engineering Research and Design*, 84(A2):113–123, February 2006.
- [6] P. Forchheimer. Wasserbewegung durch boden. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 45:1782–1788, 1901.

- [7] K. Guizien. Etude du champ de vitesses sous une et plusieurs plaques soumises à la houle et immergées près du fond. Master's thesis, Université de Nantes, 1996.
- [8] Y. Kervella. *Etude de l'impact des installations ostréicoles sur la dynamique sédimentaire par mesures in-situ, expérimentation et modélisation numérique*. PhD thesis, M2C Lab. & Ifremer, 2010.
- [9] Y. Kervella, F. Cayocca, R. Verney, H. Jestin, P. Bassoulet, P. Cann, P. Le Hir, and P. Lesueur. The impact of oyster structures on hydrodynamics in a macro-tidal environment. *Submitted to Continental Shelf Research*, 2009.
- [10] Y. Kervella, G. Germain, B. Gaurier, J.V. Facq, F. Cayocca, and P. Lesueur. Boundary layer development and shear stresses measurements around oysters tables. In *AMT'09*. AMT'09, 2009.
- [11] Y. Kervella, G. Germain, B. Gaurier, J.V. Facq, F. Cayocca, and P. Lesueur. Experimental study of the near-field impact of an oyster table on the flow. *European Journal of Mechanics / B Fluids*, September 2009.
- [12] P. Le Hir, P. Cann, B. Waeles, H. Jestin, and P. Bassoulet. Erodibility of natural sediments: experiments on sand/mud mixtures from laboratory and field erosion tests. *Sediment and Ecohydraulics*, 11:137–153, 2005.
- [13] F.R. Menter, M. Kuntz, and R. Langtry. Ten years of industrial experience with the sst turbulence model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 4:625–632, 2003.
- [14] J. Nikodic. *Dynamique sédimentaire dans la partie occidentale de la baie du Mont-Saint-Michel*. PhD thesis, Université de Nantes, 1981.
- [15] SOGREAH. Amélioration de la mytiliculture dans la baie de l'aiguillon. Technical report, LCHF, 1986.
- [16] J.M. Sornin. *Processus sédimentaires et biodéposition liés à différents modes de conchyliculture*. PhD thesis, Institut des Sciences de la Nature de l'Université de Nantes, 1981.
- [17] D. Yang, Y. Yang, and V.A.F. Costa. Numerical simulation of non-darcian flow through a porous medium. *Particuology*, 7:193–198, 2009.

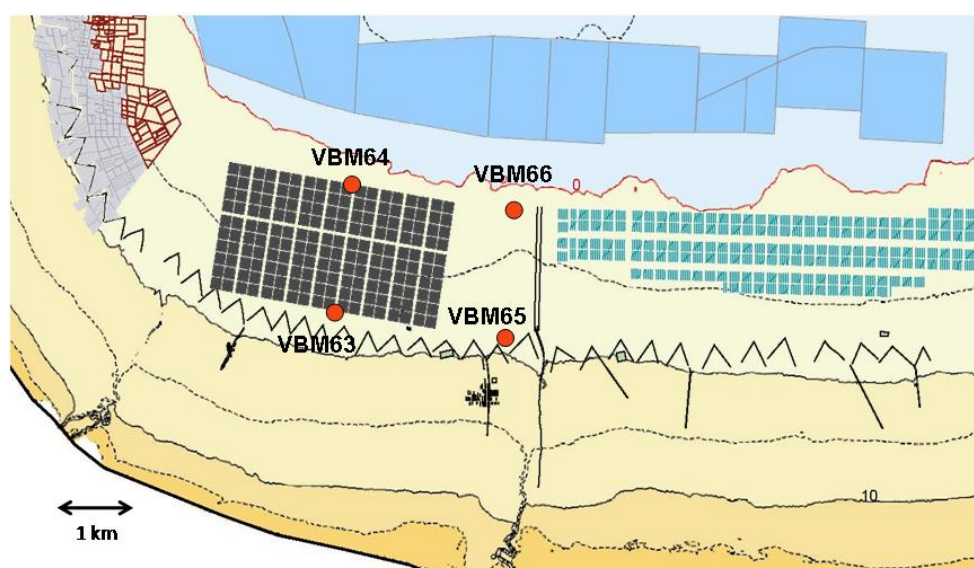
### *III.2. Moyenne échelle : compréhension des phénomènes à l'échelle d'un parc ostréicole*

Cette partie vise à déterminer l'impact des structures ostréicoles sur les courants à l'échelle globale, c'est-à-dire l'influence du parc dans son intégralité sur les courants.

Afin d'évaluer les éventuelles modifications de la propagation de ces courants de marée dues à la présence d'un parc ostréicole, nous avons installé 4 profileurs de courant ADCP (figure III.19) autour du nouveau parc ostréicole de la baie du Mont Saint-Michel, durant l'hiver 2008-2009.

Les 4 ADCP ont été positionnés de sorte à réaliser 2 estimations selon des radiales cross-shore :

- Une radiale à l'extérieur des parcs (VBM65 et VBM66) afin d'étudier la propagation des courants à côté du parc à huîtres. La topographie étant relativement uniforme dans cette zone, nous considérons que ces résultats sont représentatifs de la propagation des courants sans l'influence du parc, et cette radiale servira donc de radiale témoin.
- Une radiale à l'intérieur du parc (VBM63 et VBM64) afin d'examiner la propagation des courants sous l'influence du parc à huîtres.

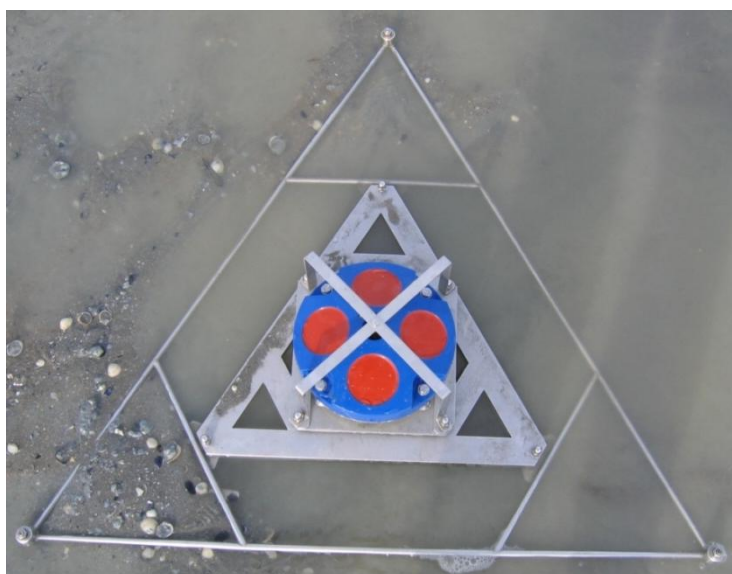


*Figure III.19: Position des ADCP en baie du Mont Saint-Michel durant l'hiver 2009*

### Caractéristiques des appareils de mesure :

appareil	Fréquence de mesure	Longueur des bursts	Cadence des bursts	Hauteur des cellules	positionnement
ACDP RDI 1200 kHz	1/3 Hz (3 s)	49 mesures (soit 2mn27s)	5 mn	20 cm	10-15 cm du fond

L'ADCP est placé sur le fond, tête vers le haut afin d'effectuer des profils de la colonne d'eau, dans un châssis amagnétique anti-chalutage (figure III.20).



*Figure III.20: ADCP RDI dans son châssis amagnétique anti-chalutage.*

Les figures (III.21) et (III.22) présentent les hauteurs d'eau et les vitesses moyennées sur la verticale pour respectivement la radiale témoin et la radiale à l'intérieur du parc ostréicole. Elles présentent aussi la différence de vitesses entre le capteur situé en bas de l'estran et le capteur situé en haut de l'estran pour chaque radiale.

Lors des vives-eaux, la vitesse mesurée peut atteindre  $0.6 \text{ m.s}^{-1}$  lors du flot et  $0.35 \text{ m.s}^{-1}$  lors du jusant. Il y a donc une très forte asymétrie des courants en baie du Mont Saint-Michel (L.C.H.F., 1977; Ifremer, 1981; Le Hir et al., 2000; Cayocca et al., 2008). Notons aussi que lors de l'étale de basse mer, il existe un courant de « vidange » de la baie orienté selon une direction Est-Ouest, de l'ordre de  $0.2\text{-}0.3 \text{ m.s}^{-1}$  en vives-eaux.

Les différences de vitesses entre les points bas- et haut-estran sont significatives lors des forts coefficients de marée (jusqu'à  $0.2 \text{ m.s}^{-1}$  en flot et jusqu'à  $0.15 \text{ m.s}^{-1}$  en jusant).



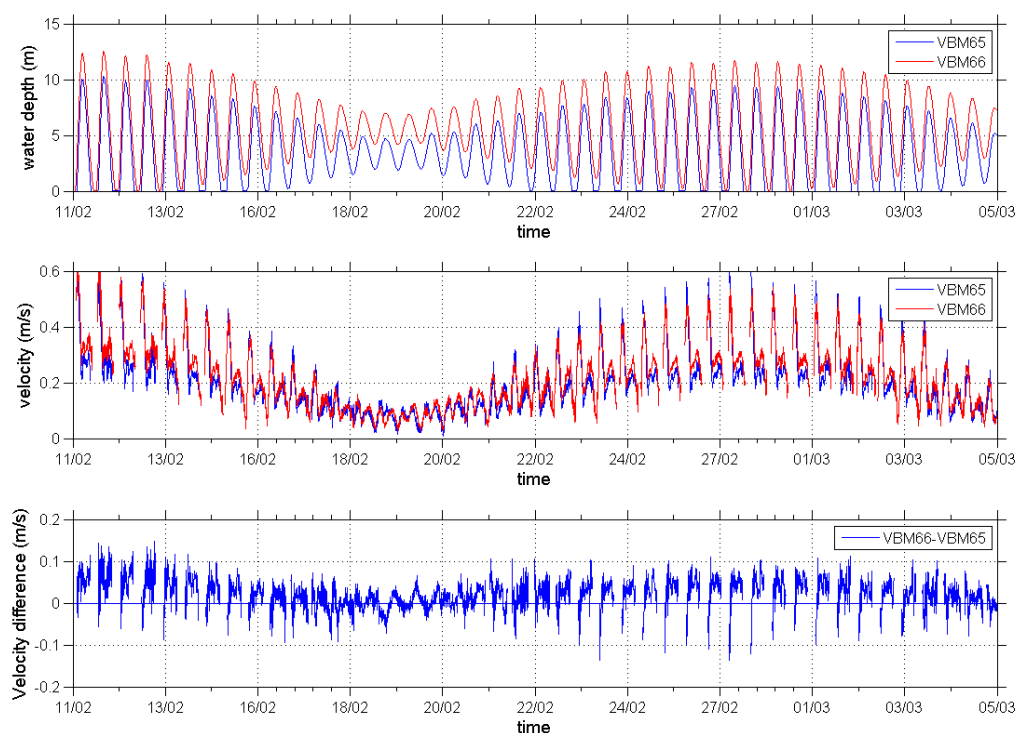


Figure III.21: hauteur d'eau, vitesses moyennées sur la verticale et différence de vitesse entre les ADCP de la radiale hors-parcs (VBM65, haut estran en bleu, et VBM66, bas estran en rouge)

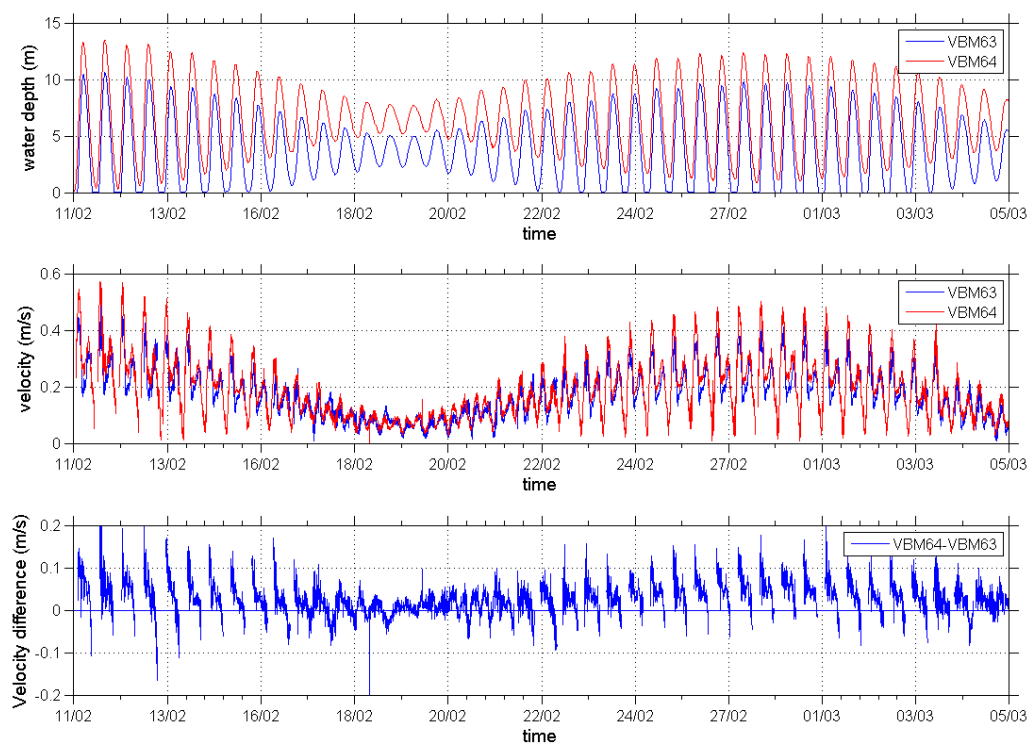
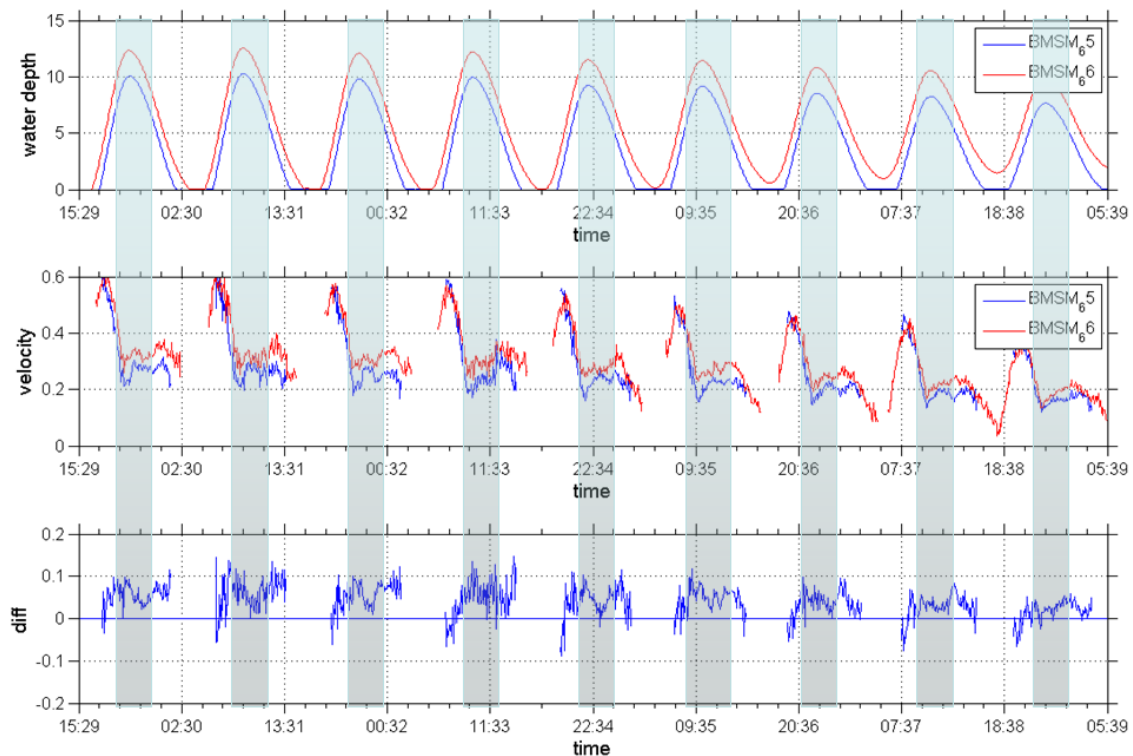


Figure III.22: hauteur d'eau, vitesses moyennées sur la verticale et différence de vitesse entre les ADCP de la radiale dans les parcs (VBM63, haut estran en bleu, et VBM64, bas estran en rouge)

Sur la radiale témoin (figure III.23), la différence de vitesse est quasiment toujours positive, sauf en tout début de flot (effet de contournement du parc). L'intensité de l'atténuation de vitesse est de 0 à 0.1 m.s<sup>-1</sup>.

Cette allure « quasi-horizontale » de la différence peut être attribuée à un effet de la bathymétrie. Le courant se propage plus vite par plus grande hauteur d'eau dans cette partie de l'estran (Le Hir et al., 2000).



*Figure III.23: hauteur d'eau, vitesses moyennées sur la verticale et différence de vitesse entre les ADCP de la radiale hors-parcs (VBM65, haut estran en bleu, et VBM66, bas estran en rouge)*

Sur la radiale située dans le parc, la différence ne présente pas une même allure : elle est positive lors du flot et négative lors du jusant (figure III.24). Cette allure « oblique » de la différence de vitesse peut être expliquée par l'effet des tables à huîtres qui rendent cette différence alternativement positive ou négative. En effet, selon le moment de la marée, flot ou jusant, il y a inversion du capteur situé en amont (respectivement en aval) du parc ostréicole vis-à-vis du sens de propagation du courant de marée (vers le haut de l'estran en flot et vers le bas de l'estran en jusant).

D'autre part, nous observons aussi l'effet de la bathymétrie, qui comme pour la radiale témoin, entraîne un « déplacement du zéro » (la valeur de la différence de vitesse à l'étale de marée haute est décalée d'environ 0.05 m.s<sup>-1</sup>).

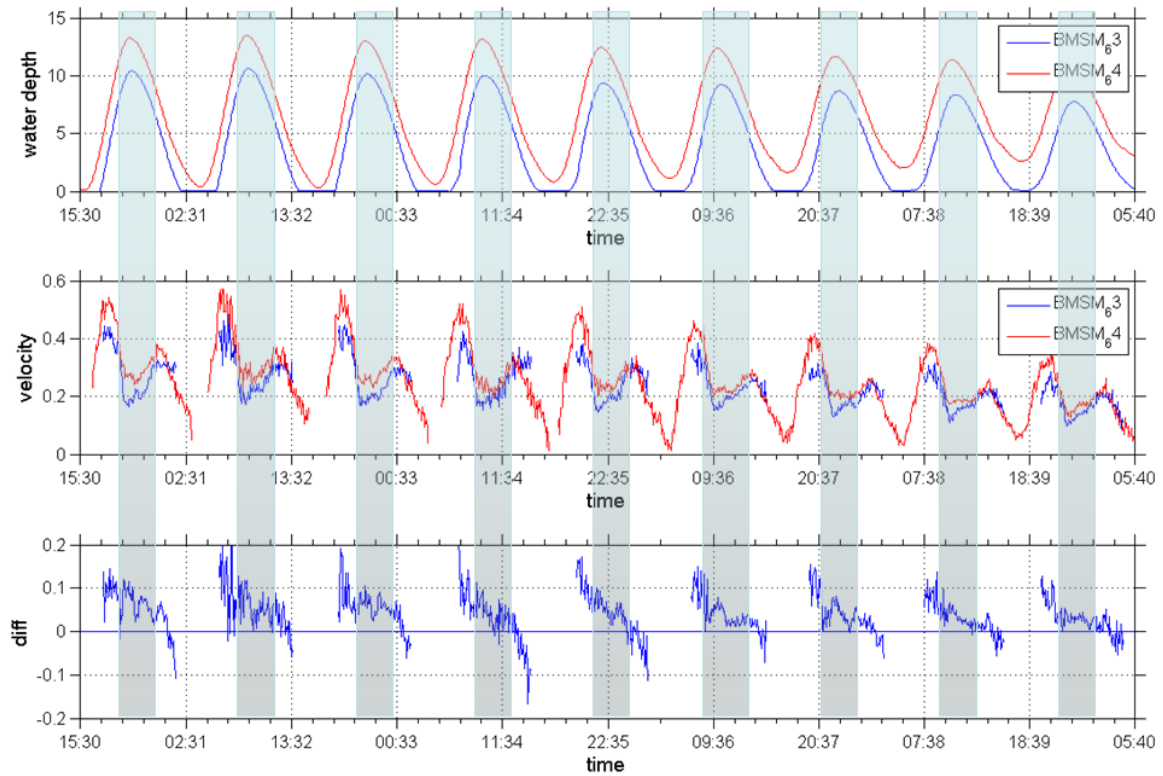


Figure III.24: (zoom) hauteur d'eau, vitesses moyennées sur la verticale et différence de vitesse entre les ADCP de la radiale dans les parcs (VBM63, haut estran en bleu, et VBM64, bas estran en rouge)

Nous observons donc un effet significatif du parc sur la propagation des courants. Cet effet est une atténuation des vitesses incidentes pouvant aller jusqu'à 60 % en début de flot et 40 % en fin de jusant.

Notons aussi que la vitesse absolue en jusant est plus importante pour le capteur haut-estran situé en début de parc que pour le capteur haut-estran de la radiale témoin. Cet effet est peut-être dû à un effet de « canalisation » inter-rangées (effet observé à plus petite échelle).

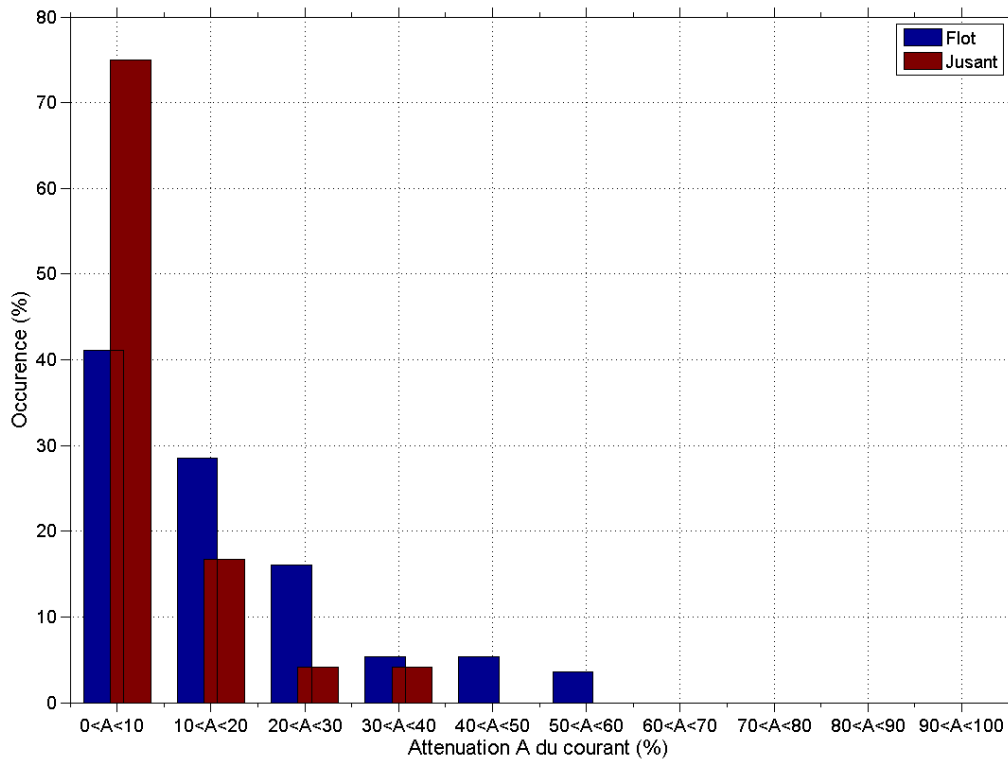


Figure III.25 : Distribution de l'atténuation du courant par le parc en flot (bleu) et en jusan (rouge).

La figure III.25, destinée à quantifier l'effet observé, présente la distribution de l'atténuation  $A$  du courant par le parc, où :

$$A = \left( \frac{v_1 - v_2}{v_1} - A_{\text{témoin}} \right) * 100$$

Avec  $v_1$  la vitesse du capteur situé en amont du parc (alternativement le capteur bas-estran en flot et le capteur haut-estran en jusan),  $v_2$  la vitesse du capteur situé en aval du parc (alternativement le capteur haut-estran en flot et le capteur bas-estran en jusan) et  $A_{\text{témoin}}$  l'atténuation calculée sur la radiale témoin (due à la bathymétrie).

Cette atténuation est dans la plupart des cas relativement faible en jusan (70 % du temps inférieure à 10 %) et plus conséquente en flot (60 % du temps supérieure à 10 %).

Nous cherchons donc à comprendre quels sont les paramètres qui influent sur cette atténuation. La figure III.26 présente ainsi l'atténuation due au parc en fonction de la vitesse incidente du courant, en flot et en jusan.

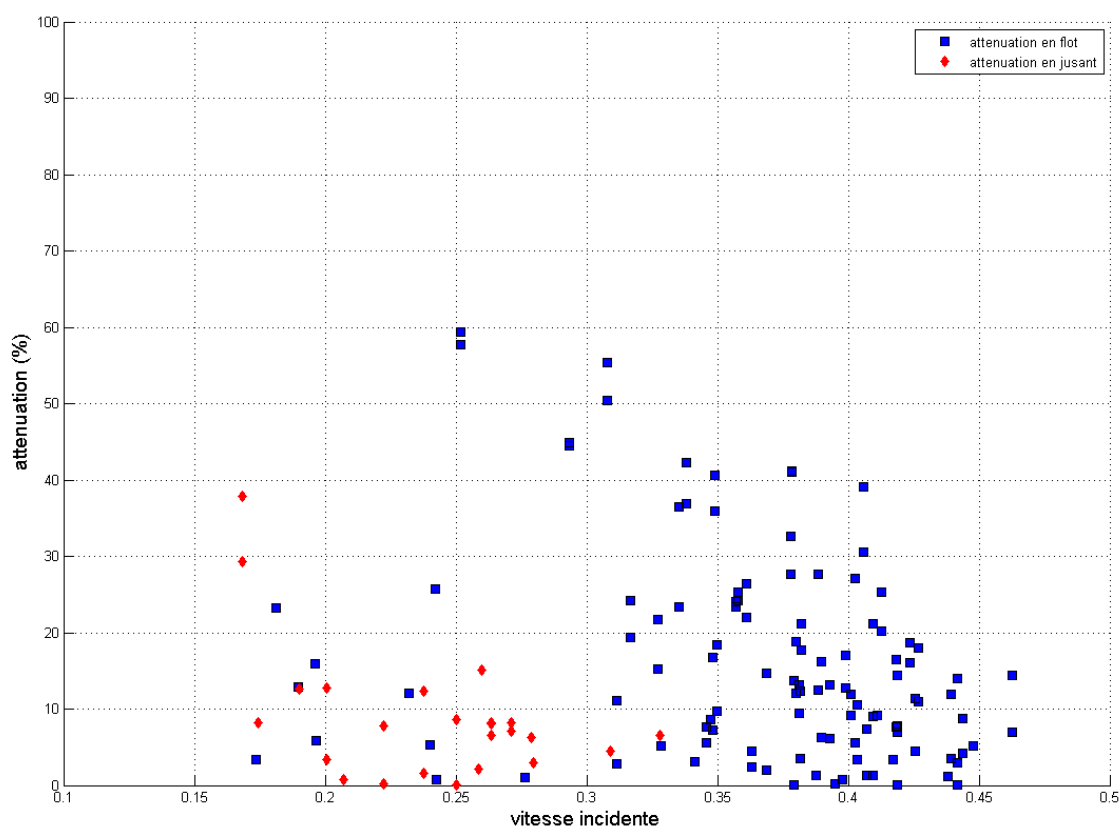


Figure III.26 : Atténuation du courant par le parc en fonction de la vitesse incidente (en m/s) du courant, en flot (bleu) et en jusant (rouge).

Les vitesses incidentes les plus élevées correspondent bien aux épisodes de flot mais le maximum d'atténuation n'intervient pas pour ces grandes vitesses. Il n'existe donc pas de relation évidente entre la vitesse incidente du courant et l'atténuation due au parc ostréicole pour les épisodes de flot. En jusant, la conclusion n'est pas la même : une relation existe entre l'atténuation et la vitesse incidente.

On peut alors se demander si cette atténuation est liée à la hauteur d'eau : la signature des tables à huîtres se retrouve-t-elle sur toute la colonne d'eau ou est-elle limitée à une certaine hauteur proche de leur hauteur propre ?

Intuitivement, par faibles hauteurs d'eau, l'atténuation devrait être plus importante du fait de l'occupation maximale de la colonne d'eau par les tables ostréicoles. Néanmoins, nous voyons sur la figure III.27 que les plus fortes atténuations interviennent en effet par faible hauteur d'eau mais qu'il n'existe pas non plus de relation évidente entre l'atténuation due au parc et la hauteur d'eau en flot (atténuations importantes par 6-7 m d'eau). En jusant, une relation semble par contre exister.

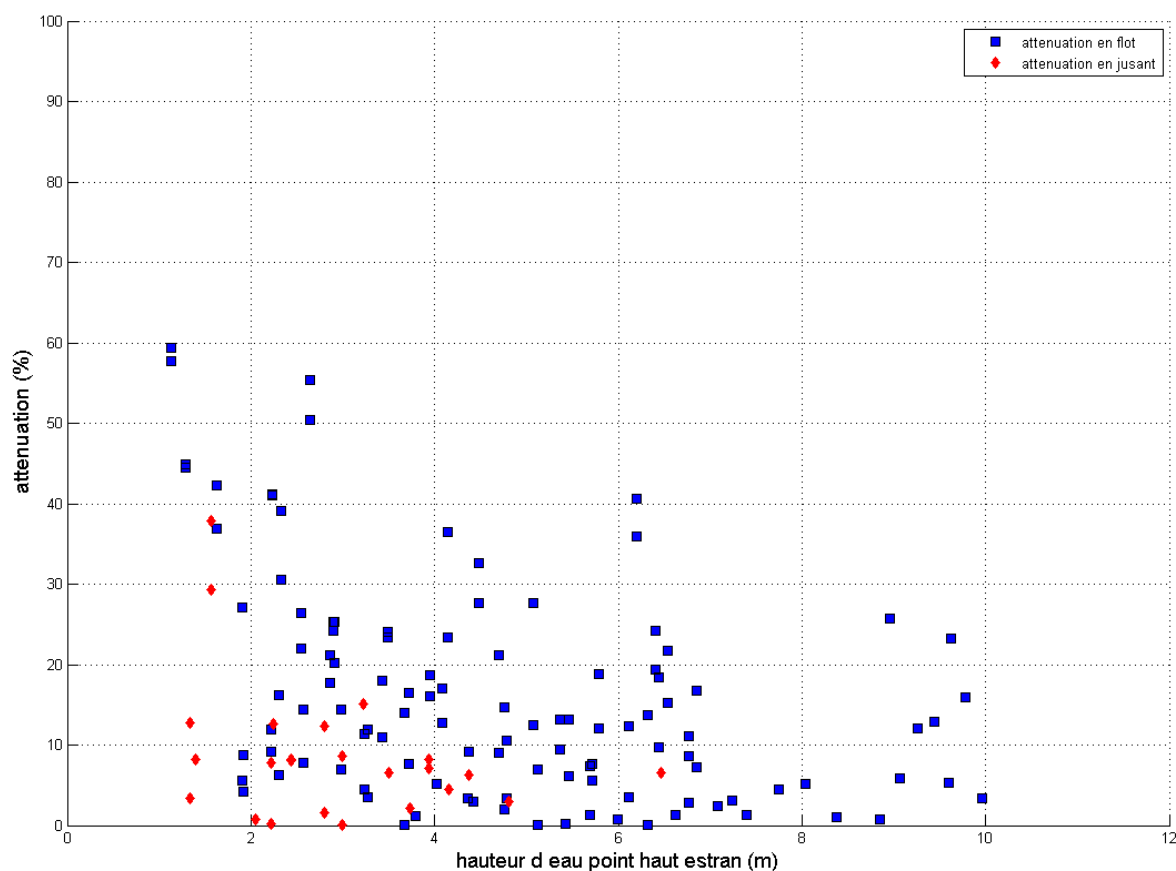


Figure III.27: Atténuation du courant par le parc en fonction de la hauteur d'eau en haut du parc du courant, en flot (bleu) et en jusant (rouge).

Pour confirmer cette affirmation, nous traçons les profils de vitesses sur les deux radiales en distinguant un épisode de flot et un épisode de jusant significatifs (figure III.28 et III.29).

Pour l'épisode de flot, nous observons une différence entre les capteurs bas- et haut-estran en début d'épisode (7h25). Le capteur situé en haut de l'estran (tracé bleu) présente une vitesse plus importante que celui situé en bas de l'estran. Cet effet est peut-être dû à un contournement du parc par la masse d'eau ; on voit en effet que la valeur absolue de la vitesse est plus importante hors des parcs. Ensuite, tout au long du flot, les vitesses amont et aval sont très proches pour la radiale hors parc.

En ce qui concerne la radiale située dans le parc, nous observons une différence de vitesse tout au long de l'épisode de flot, avec une vitesse supérieure pour le capteur situé en amont (significatif à 8h00). Cette différence est caractéristique de la

présence des structures. Nous pouvons noter que la différence s'établit sur toute la colonne d'eau et n'est donc pas uniquement une signature localisée sur la hauteur des tables.

Pour l'épisode de jusant, nous voyons que les résultats de la radiale témoin sont très similaires en bas et en haut de l'estran (les vitesses sont aussi plus faibles que lors de l'épisode de flot).

En ce qui concerne la radiale dans le parc ostréicole, les conclusions sont les mêmes que lors de l'épisode de flot : les vitesses en amont du parc (cette fois-ci, ce sont les vitesses enregistrées par le capteur en haut de l'estran, en bleu) sont supérieures aux vitesses du capteur situé en aval (en rouge), sur toute la colonne d'eau. Par contre, plus la hauteur de cette colonne d'eau est faible, plus l'atténuation des courants est importante.

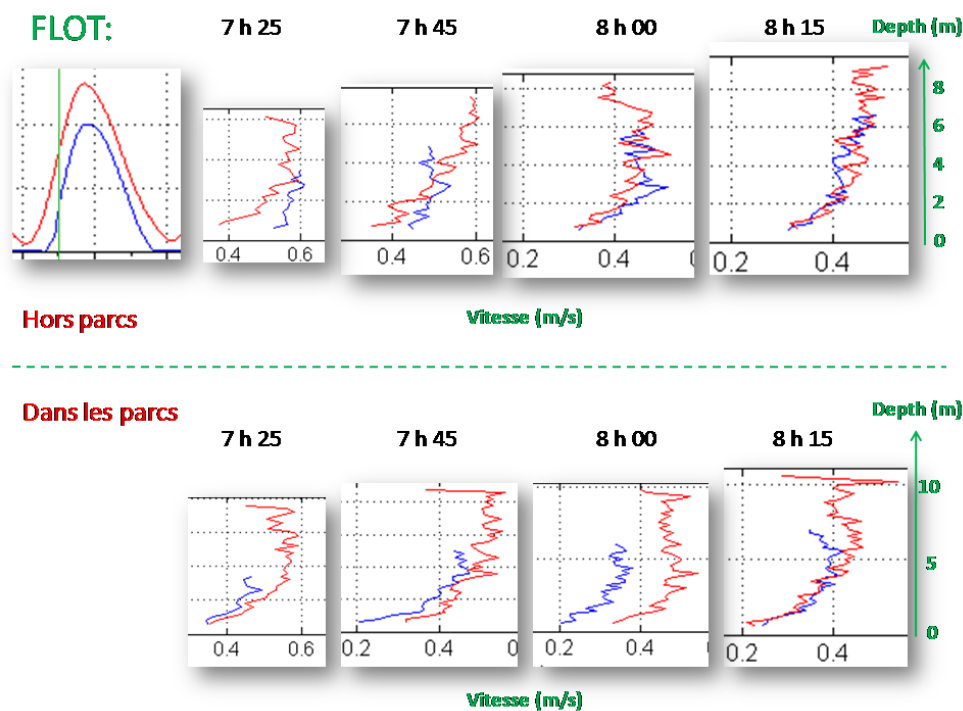


Figure III.28: profils de vitesse durant le flot hors des parcs (en haut) et dans les parcs (en bas). Le trait rouge représente le capteur en bas de l'estran et le trait bleu représente le capteur en haut de l'estran.



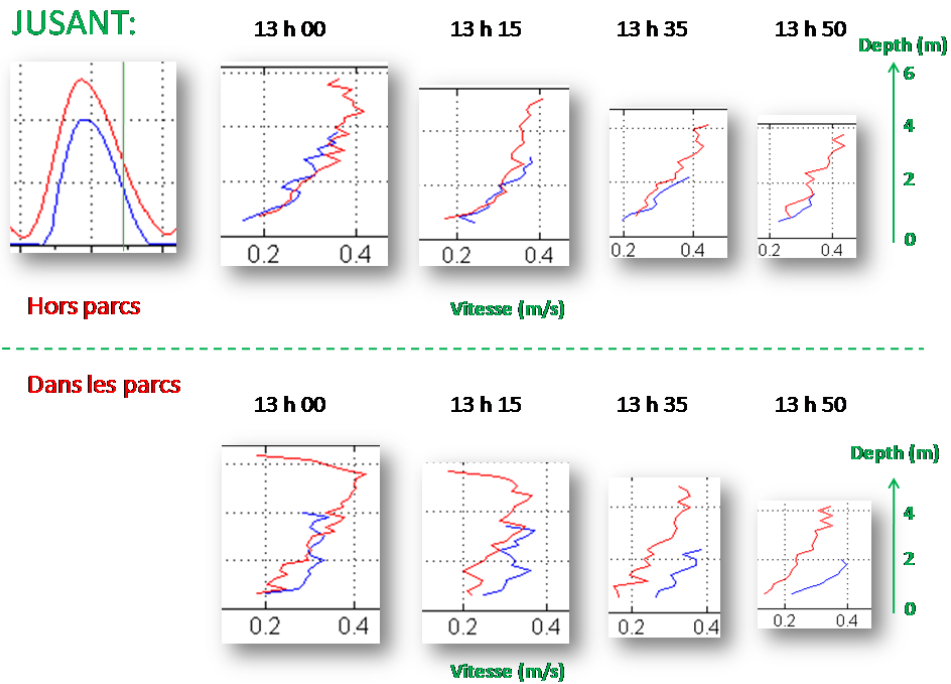


Figure III.29: profils de vitesse durant le jusant hors des parcs (en haut) et dans les parcs (en bas). Le trait rouge représente le capteur en bas de l'estran et le trait bleu représente le capteur en haut de l'estran.

### Conclusions :

L'impact d'un parc ostréicole sur les courants a été étudié par le biais de mesures in-situ, grâce à des profileurs de courant. Cet impact est significatif lors des forts coefficients de marée. Du fait de l'asymétrie des courants de marée observée en baie du Mont Saint-Michel, l'atténuation des courants par le parc n'est pas la même en flot et en jusant: jusqu'à 60 % d'atténuation des vitesses en flot et jusqu'à 40 % d'atténuation en jusant (atténuation de 50 % évoquée par (Sornin, 1981)). La signature des structures est visible sur les profils de vitesse et s'étend sur toute la colonne d'eau.

## Ce qu'il faut retenir de l'impact des structures ostréicoles sur les courants

### ➤ En champ proche :

- Les mesures réalisées in-situ dans la Baie du Mont Saint-Michel révèlent que les courants sont localement modifiés par la présence d'une table à huîtres, en terme d'intensité et de direction. Les vitesses locales sont plus importantes sous la table lors du flot (jusqu'à 50 % d'augmentation) et inversement, plus importantes dans l'allée entre deux tables durant le jusant (jusqu'à 40 % d'augmentation). Une réorientation des vecteurs vitesses dans l'axe des tables est observée, jusqu'à 15° lors du flot et jusqu'à 20° lors du jusant.
- Grâce à la réalisation de maquettes de tables à huîtres à l'échelle ½ et à leur incorporation dans une veine de courant de grandes dimensions, nous avons pu mettre en évidence l'importance des interactions entre la couche limite inférieure de la table et la couche limite de fond qui donnent lieu à des zones préférentielles de dépôt de sédiments, ainsi que l'effet de la succession de deux tables et de leurs interactions. Des contraintes de Reynolds ont été mesurées sur toute la colonne d'eau en présence des structures ostréicoles ; aucune modification significative de la contrainte sur le fond n'a été observée. La contrainte totale (sur toute la colonne d'eau) est quant à elle fortement amplifiée au passage du courant sur les structures. Il y a donc une augmentation de la turbulence par les tables à huîtres qui se traduit par une diminution de l'intensité des courants en présence par dissipation d'énergie. Une des conséquences en termes de sédiments est la création d'une zone de fragmentation des particules en suspension autour de la table.
- Un modèle numérique tridimensionnel calibré par les mesures expérimentales a été mis en place. L'extension de ce modèle à des dimensions réelles a été effectuée et a permis de mettre en évidence des zones de forte réduction de vitesse, propices à d'éventuels envasements. Ce modèle devrait permettre à terme de représenter un parc ostréicole dans son intégralité.
- Il n'est pas évident de comparer ces trois approches (in-situ, expérimentale et numérique), les mesures in-situ (sur un site donné de surcroît) de l'impact d'une table étant en effet influencées par la présence des tables adjacentes, et ces mesures étant de surcroît difficilement « multipliables » spatialement (cela nécessiterait un déploiement simultané d'un très grand nombre d'appareils). Néanmoins, nous pouvons remarquer que toutes les approches concluent à des modifications locales du courant par la présence d'une table à huîtres, que ce soit en termes d'intensité ou de changement d'orientation.

### ➤ A l'échelle du parc :

- Les mesures in-situ révèlent un impact significatif en vives-eaux des structures sur les courants. L'intensité de l'atténuation engendrée dépend du moment de la marée et de la vitesse du courant incident.
- Cette atténuation s'étend sur toute la colonne d'eau. Elle est néanmoins fonction de la vitesse incidente et de la hauteur d'eau durant le jusant.





# Chapitre IV: « For those who like sediments »\*

\* Leo C. van Rijn (Van Rijn, 1993), “Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas”.

## Contenu :

**Impact local des structures sur la turbidité**

**Contrainte critique de cisaillement vs hydrodynamique à moyenne échelle**

**Impact local des structures sur l’altimétrie du sédiment**

Après avoir étudié l'impact des installations ostréicoles sur les forçages hydrodynamiques gouvernant la dynamique sédimentaire, nous nous intéressons à la compréhension des processus responsables des mouvements des sédiments dans leur environnement.

Le sédiment est en effet le « fil conducteur » de notre étude : son accumulation, parfois massive, a motivé ce travail ; son dépôt peut aussi être la conséquence des modifications hydrodynamiques observées.

Dans ce chapitre, nous nous efforcerons donc de lier les conclusions sur les modifications des forçages hydrodynamiques présentées dans les deux précédents chapitres au sédiment en présence.

Nous évoquerons ainsi, dans un premier temps, l'impact local des structures sur la turbidité, paramètre étroitement lié à la contrainte de cisaillement sur le fond.

Nous lierons ensuite la diminution de la contrainte de cisaillement induite par l'atténuation des vagues par les structures, à la modification du transport sédimentaire.

Nous présenterons aussi une étude réalisée à Marennes-Oléron visant à déterminer l'impact d'une table à huîtres sur l'altimétrie du sédiment, en lien avec les forçages hydrodynamiques affectant ce sédiment.

Un autre phénomène (qui n'est pas étudié dans ce manuscrit), inhérent aux cultures conchyliques et qui se révèle être très important en terme d'envasement (Sornin, 1981; Sornin, 1983; Sornin, 1984; Bouchet et al., 2007), est la biodéposition :

Les huîtres sont des organismes filtreurs qui rejettent des particules organiques ou inorganiques dans la colonne d'eau. Ces particules vont ensuite sédimenter : ce phénomène est appelé « biodéposition » (de l'anglais *biodeposition*).

On distingue deux sortes de biodépôts : les fèces, qui sont des agglomérats de particules ayant traversé l'appareil digestif des huîtres, et les pseudo-fèces, qui sont rejetés, car non-comestibles, avant d'avoir pu pénétrer dans l'appareil digestif.

Un parc ostréicole peut donc être considéré comme un filtre biologique, horizontal et immobile, qui ingurgite les particules fines de la colonne d'eau qui passent à l'intérieur des poches à huîtres et les rejettent sous forme de fèces et de pseudo-fèces.

Ces fèces et pseudo-fèces sont composées des particules fines filtrées par les mollusques et de mucus qui permet l'agglomération de ces particules fines.

Leur vitesse de sédimentation est donc bien plus importante (leur masse est plus importante) que la vitesse de chute des particules fines qui les composent (vitesse multipliée dans des eaux calmes par un facteur de 20 à 200 selon (Haven and Morales-Alamo, 1966; Haven, 1968; Kusuki, 1981; Mitchell, 2006). Les sédiments

sont ainsi souvent plus riches en matière organique et plus fins dans les zones de culture sur tables que dans les zones adjacentes (Forrest and Creese, 2006).

La turbidité engendrée par la production de biodépôts limite la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau et ainsi la production phytoplanctonique (Ravail-Legrand, 1993). La biodéposition perturbe les communautés benthiques (Ritz et al., 1989; Weston, 1990) et surtout, d'après Sornin (1981), « prend une part importante dans les problèmes d'exhaussement et d'envasement des zones conchylicoles ».

La même constatation est faite par (Bouchet et al., 2007) sur l'exhaussement ainsi que l'enrichissement en matière organique des sols par les biodépôts. Il ajoute que la culture à plat des huîtres perturbe moins l'environnement benthique que la culture sur tables, qui a un « effet négatif sur l'hydrodynamisme local » et favorise ainsi une sédimentation accrue des biodépôts.

L'importance des effets de la biodéposition dépend en premier lieu de la densité et de la biomasse des huîtres en présence, mais aussi des caractéristiques environnementales. Dans les zones de culture intertidales, la capacité de l'environnement quant à l'assimilation et la dispersion des biodépôts est principalement due à la vitesse des courants et à l'action des vagues (Forrest, 2007) ; l'augmentation des courants et des vagues réduisant la biodéposition (Findlay et al., 1997).

(Giles et al., 2006) ont d'ailleurs mené des études sur l'impact de la sédimentation due aux mollusques en Nouvelle-Zélande et ont conclu qu'il était nécessaire de mener des études hydrodynamiques spécifiques lors de l'installation de nouvelles fermes, afin de prévenir les modifications trop importantes de la dynamique des nutriments.

Selon les conclusions des chapitres précédents, les installations ostréicoles ont pour effet de réduire l'intensité des courants de marée et d'entraver la propagation des vagues, ce qui aura donc tendance à accentuer ce phénomène de biodéposition.

Il est difficile de quantifier in-situ ce phénomène, les paramètres à mesurer étant souvent difficilement identifiables, ainsi que les zones où les prélèvements doivent être effectués du fait de la dispersion de ces biodépôts spécifique à chaque site d'étude.

Cette biodéposition peut aussi être évaluée à l'aide de modèles d'écophysiologie (Hawkins et al., 1999). L'utilisation de ce modèle permet d'estimer la production de biodépôts en fonction de la teneur en matières en suspension dans la colonne d'eau, de la capacité des huîtres à filtrer et à ingérer ces suspensions, de la quantité d'huîtres au m<sup>2</sup> et de leur temps d'immersion.

Des études spécifiques sont donc nécessaires pour qualifier et quantifier la part de cette biodéposition dans le phénomène d'envasement observé dans les zones ostréicoles.



#### *IV.1. Impact local des structures sur la turbidité*

La turbidité désigne la teneur de l'eau en matières en suspension qui la troublent. La turbidité permet donc de traduire la présence de sédiments fins dans la colonne d'eau, suite à des érosions, locales ou non, du fond sédimentaire. C'est un paramètre très important au point de vue écologique ; en effet elle peut limiter la pénétration des rayons lumineux dans l'eau, donc la photosynthèse, et est ainsi un agent de contrôle de la production primaire. Il existe donc de très fortes interactions entre la turbidité et les organismes filtrants en présence.

Le but de cette étude est de comprendre les situations d'envasement observées, notamment les buttes de vases se formant sous les tables, dont la formation est sûrement liée aux modifications hydrodynamiques évoquées dans les précédents chapitres mais aussi à des différences locales de turbidité. Ainsi, afin d'évaluer les éventuelles différences de teneur de l'eau en matières en suspension sous une table ostréicole et à côté d'une table ostréicole (dans une allée entre deux rangées de tables), nous avons installé deux turbidimètres dans le parc ostréicole de notre zone d'étude de la baie du Mont Saint-Michel (cf figure II.1) durant l'hiver 2007.

Malheureusement, un seul de ces turbidimètres (celui situé sous la table, figure IV.1) a fonctionné.



*Figure IV.1: turbidimètre situé sous une table à huîtres en baie du mont Saint-Michel (à droite de l'image)*

Ce turbidimètre est une sonde optique multi-paramètres TROLL 9500 WQP-1000, que nous avons configurée pour effectuer une mesure (turbidité, pression,

température et salinité) toutes les deux minutes en continu du 19 février 2007 au 20 mars 2007.

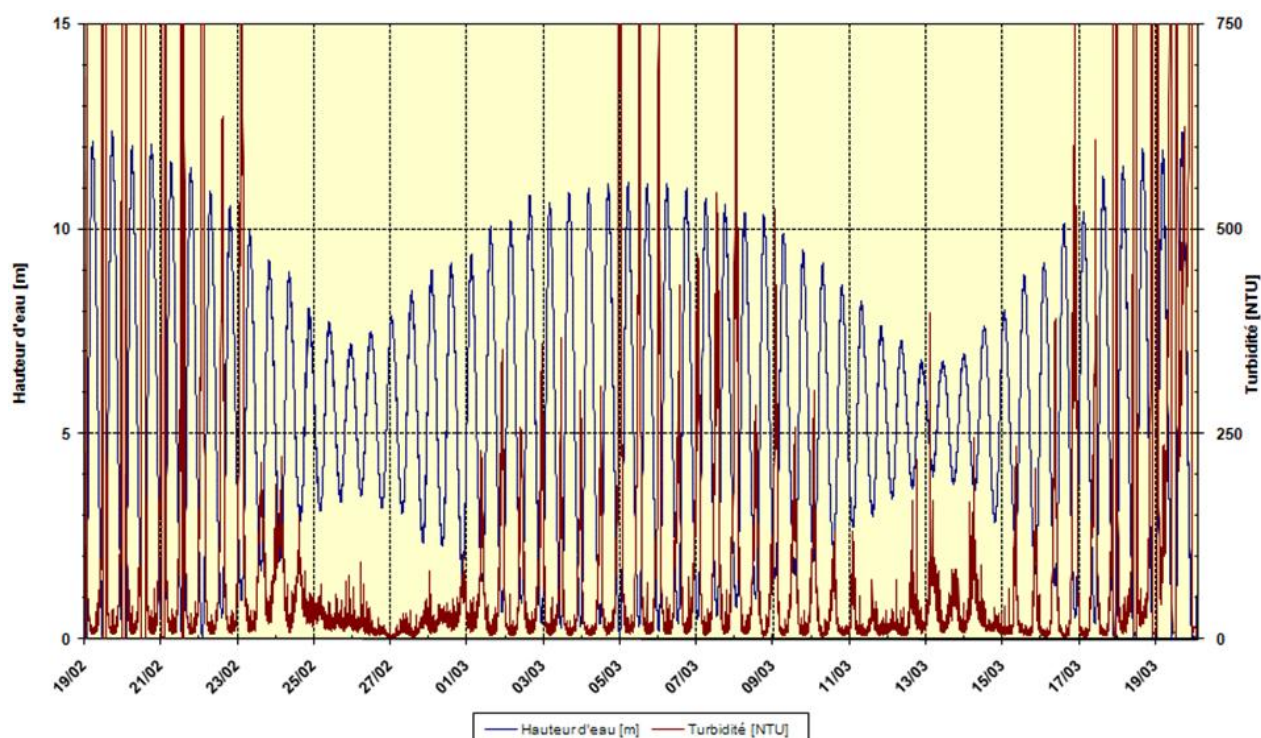


Figure IV.2: turbidité en NTU (tracé bordeaux) et hauteurs d'eau en mètres (tracé bleu) enregistrées par la sonde optique multi-paramètres TROLL en baie du Mont Saint-Michel durant l'hiver 2007.

La figure IV.2 présente les résultats obtenus. Les résultats de turbidité sont présentés en NTU (Nephelometric Turbidity Unit) et nous effectuons donc un calibrage afin de passer aux matières en suspension (MES, en mg/l). Le dispositif nécessaire au calibrage ainsi que la courbe de correspondance obtenue sont présentés en figure IV.3. Le calibrage est effectué à partir de prélèvements d'eau chargée et de vase superficielle du site d'étude (voir détails de la procédure du calibrage pour l'ADV ci-après).

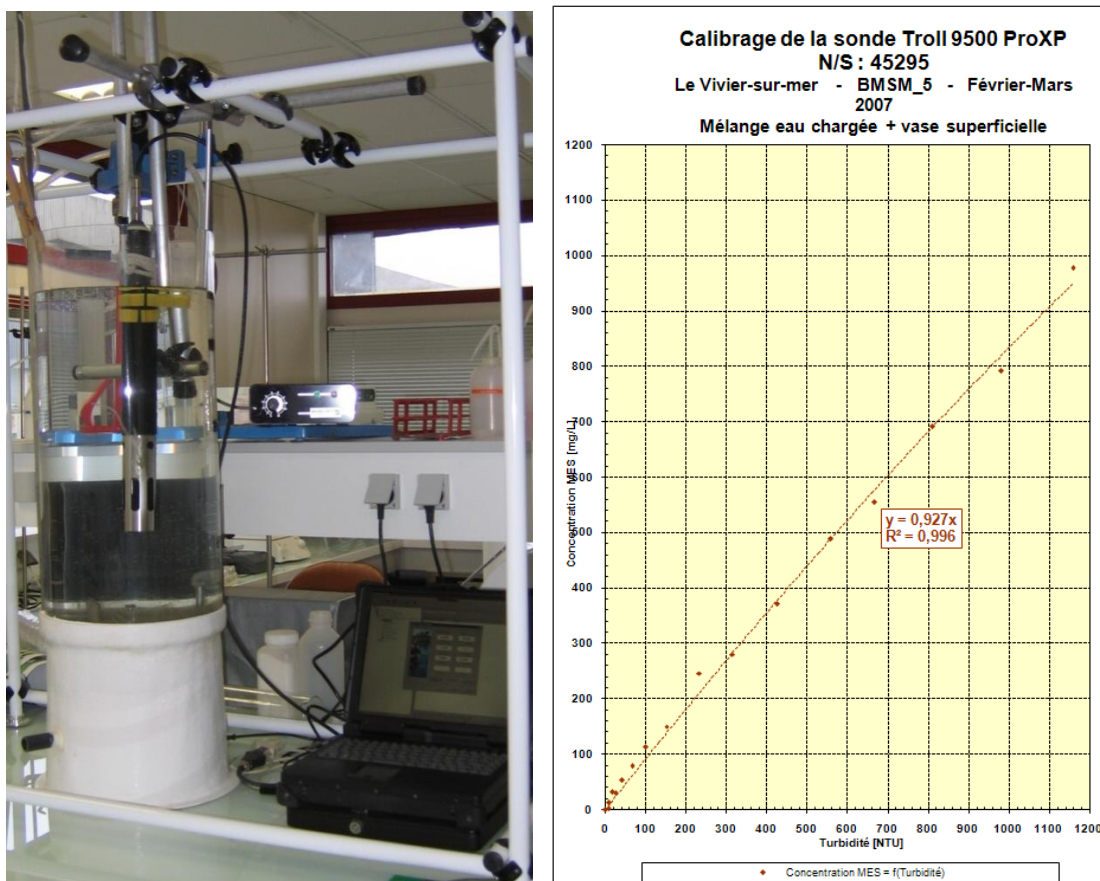
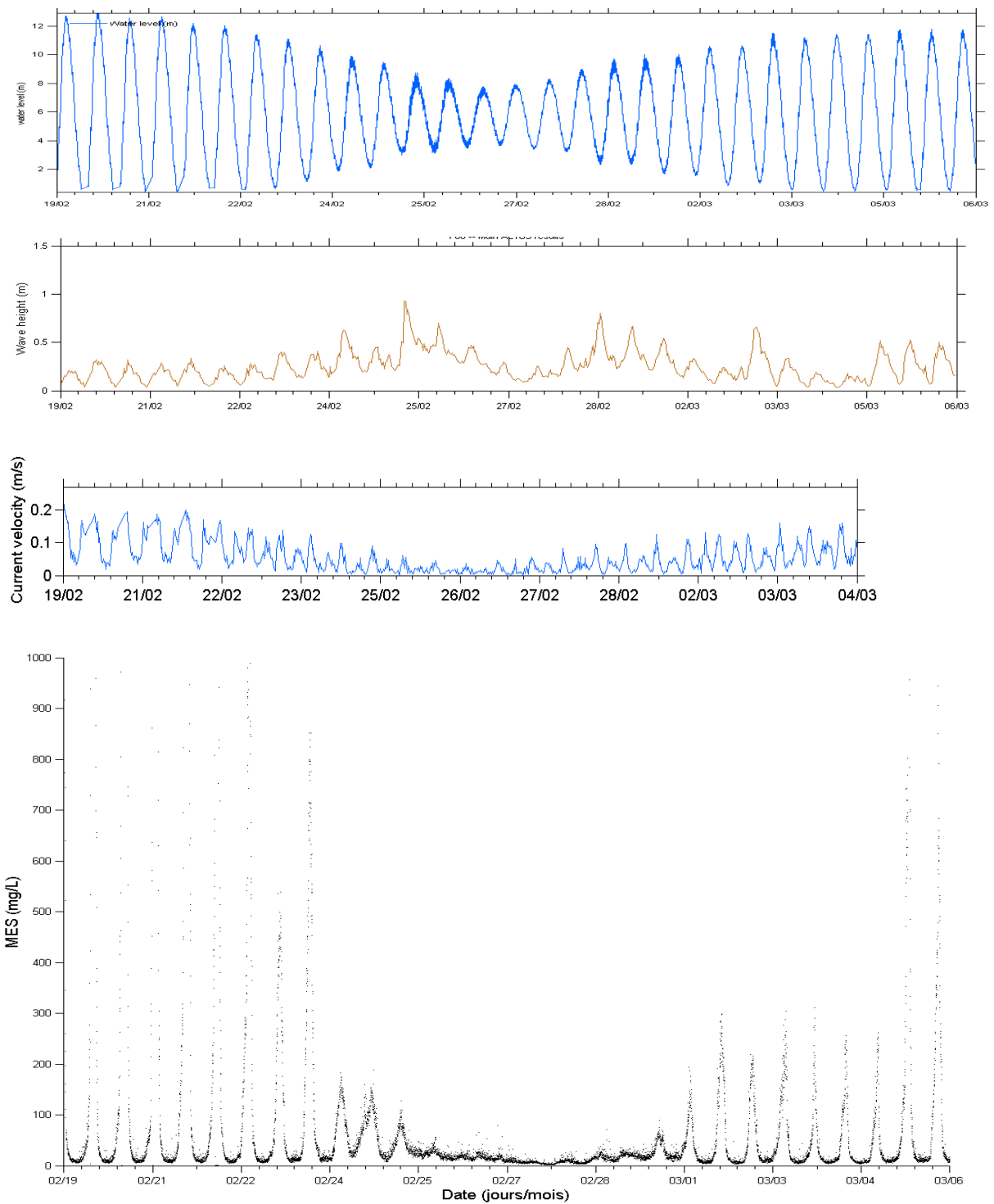


Figure IV.3: Dispositif de calibrage de la sonde TROLL en laboratoire (à gauche) et courbe de calibrage NTU-MES obtenue (à droite)

La figure IV.4 montre les résultats obtenus en matière de turbidité après ce calibrage (avec un rappel de la hauteur d'eau, des hauteurs significatives de vagues et de la vitesse du courant près du fond pendant la même période de mesure).

Les maxima de turbidité interviennent lors de l'étale de marée basse, par forts coefficients de marée, avec des valeurs maximales de  $2 \text{ g.l}^{-1}$ . On remarque d'ailleurs que le taux de matières en suspension est très fortement corrélé à la vitesse du courant sur le site, et non pas aux épisodes de vagues. Ce qui tendrait à montrer que la turbidité est peut-être davantage liée au transport de particules (advection) plutôt qu'à des remises en suspension de particules autochtones.

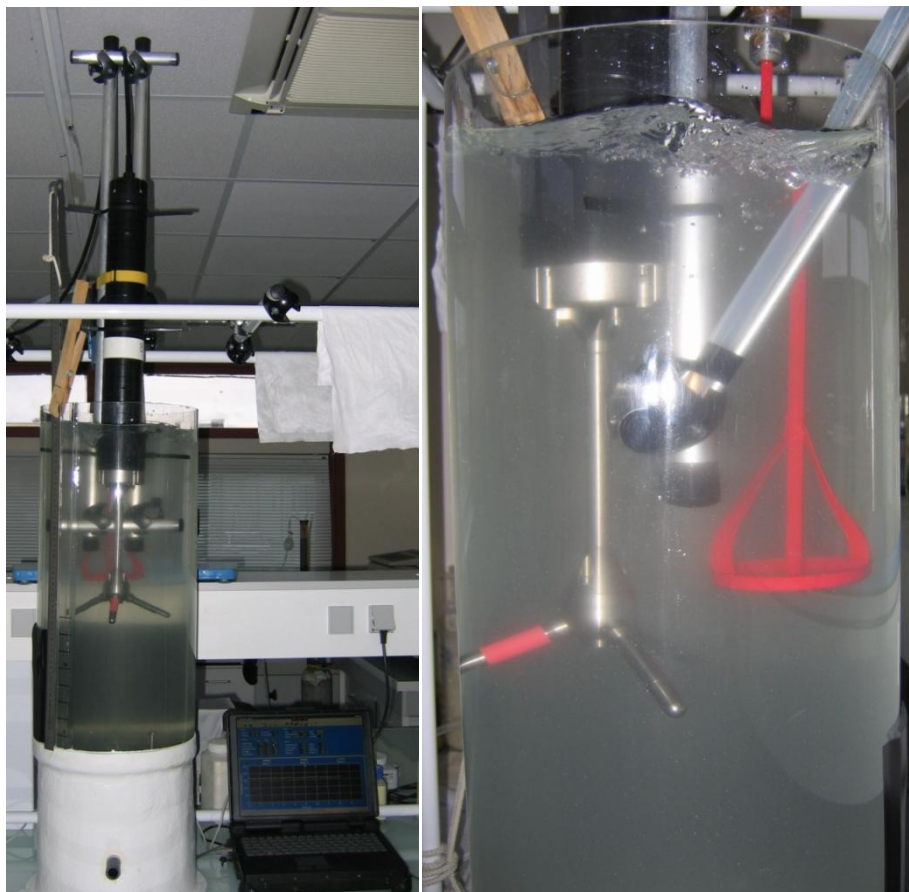


*Figure IV.4: hauteur d'eau, hauteur significative de vagues, vitesse du courant près du fond et taux de matières en suspension au centre du nouveau parc ostréicole en baie du Mont Saint-Michel (point P6 figure II.25).*

A proximité des turbidimètres, nous avons placé deux courantomètres ADV, l'un sous une table ostréicole et l'autre dans une allée entre deux tables, durant 15 jours au centre du nouveau parc ostréicole (cf chapitre III).

Ces courantomètres acoustiques, dont la mesure est basée sur l'effet Doppler, fournissent des intensités acoustiques de réception pour la validation de la mesure. Ces intensités peuvent être calibrées avec différentes concentrations de particules en suspension afin de les relier à la turbidité (Voulgaris and Meyers, 2004; Verney et al., 2007). Ce calibrage reste néanmoins très complexe et demande beaucoup de minutie quant au protocole expérimental.

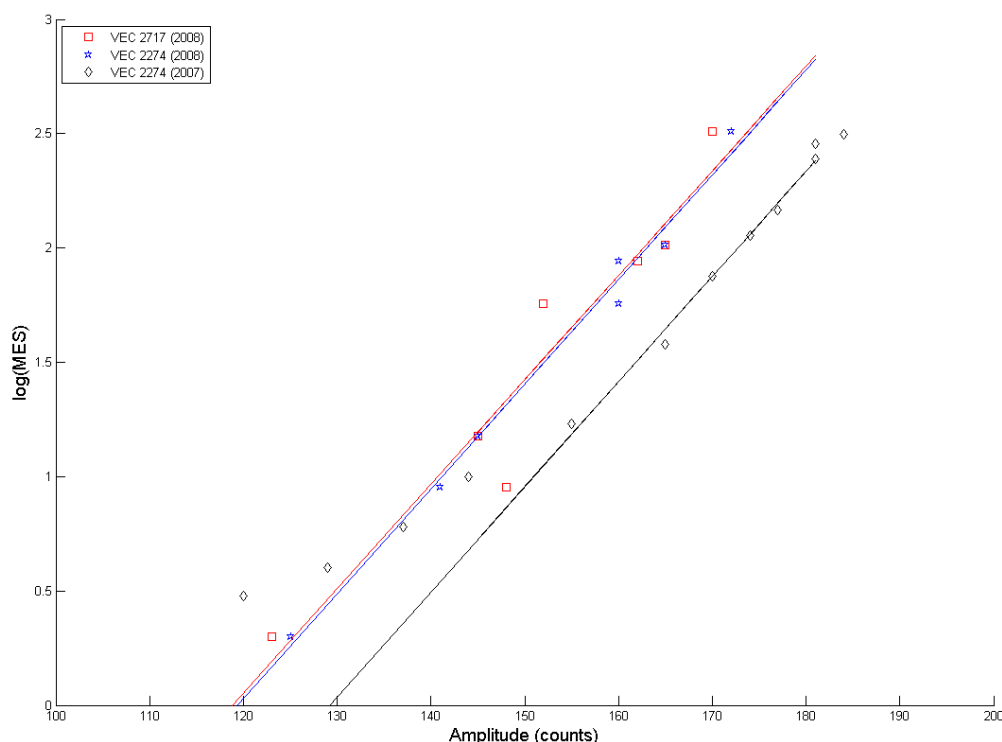
Ainsi, à partir des échantillons d'eau chargée et de vase superficielle prélevés dans le parc ostréicole, nous calibrons les deux ADV dans une même cuve : de l'eau très chargée (ajout de vase superficielle pour augmenter la concentration en MES) est introduite dans la cuve et homogénéisée à l'aide d'un mélangeur (figure IV.5). Chaque ADV émet des signaux acoustiques qui se réfléchissent sur les particules en suspension et enregistre les signaux réfléchis pendant environ 4 minutes (l'intensité moyenne durant le « burst » de ces signaux réfléchis est prise en compte). Un échantillon d'eau chargée est alors prélevé afin de mesurer le taux de MES qu'il contient (en mg/l). Nous procédons ensuite à une dilution afin que ce taux de MES dans la cuve diminue et les mesures reprennent. Le cycle est ainsi répété jusqu'à dilution complète de l'eau chargée (taux de MES proche de zéro).



*Figure IV.5: Dispositif de calibrage des ADV en laboratoire : à gauche, ADV plongé dans la cuve expérimentale ; à droite, tête de l'ADV et mélangeur (rouge) plongés dans de l'eau chargée en particules.*



Malheureusement, le calibrage simultané des 2 ADV n'a pas été possible les jours suivant la mission de 2007. Un seul ADV a donc été calibré à ce moment, avec les sédiments provenant du site d'étude (tracé noir sur la figure IV.6). En 2008, un calibrage simultané des deux ADV (tracés bleu et rouge) a été réalisé avec des sédiments prélevés à proximité du parc ostréicole, à quelques centaines de mètres du site d'étude de 2007. Les résultats ont montré que les réponses respectives des ADV étaient quasiment identiques. Nous faisons donc dans la suite cette hypothèse de réponses identiques des deux ADV vis-à-vis de la concentration en présence.



*Figure IV.6: courbes de calibrage des ADV Vector Nortek : le tracé noir correspond aux valeurs de 2007, les tracés rouge et bleu correspondent à celles de 2008. L'intensité acoustique de réception est présentée en abscisse (en counts) et le log du taux de MES en ordonnée.*

Nous pouvons alors utiliser la courbe de correspondance counts-MES (relation intensité acoustique / teneur en MES) obtenue en 2007 pour calibrer les mesures des deux ADV afin d'en extraire les données de turbidité durant nos 15 jours de mesure en baie du mont Saint-Michel. Nous pouvons ainsi comparer la turbidité mesurée sous une table à huitre à celle mesurée dans une allée entre deux tables (figure IV.7).

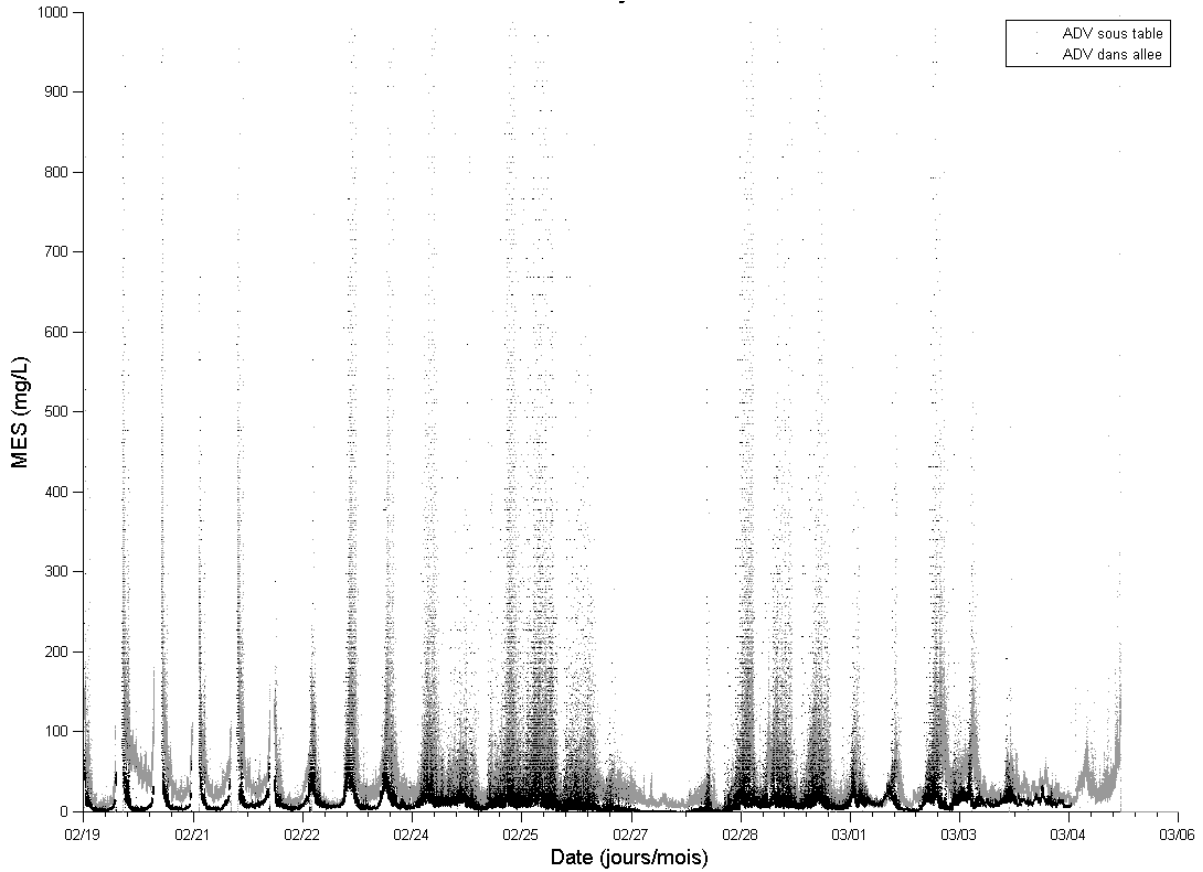


Figure IV.7 : Teneur en MES (en mg/L) mesuré au point P6 du 19 février 2007 au 5 mars 2007 : signal brut de l'ADV situé dans l'allée (tracé noir) et signal brut de l'ADV situé sous la table (tracé gris).

Les signaux bruts obtenus à haute-fréquence sont moyennés par burst de mesures. Les écart-types  $\sigma$  sont calculés pour chaque burst, afin de traduire la variabilité de la mesure, selon la formule suivante :

$$\sigma = \left( \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Avec :  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

L'ADV placé sous la table à huîtres (figure IV.8) traduit la même dynamique de turbidité, surtout liée à l'action des vagues, que l'ADV placé dans l'allée (figure IV.9).



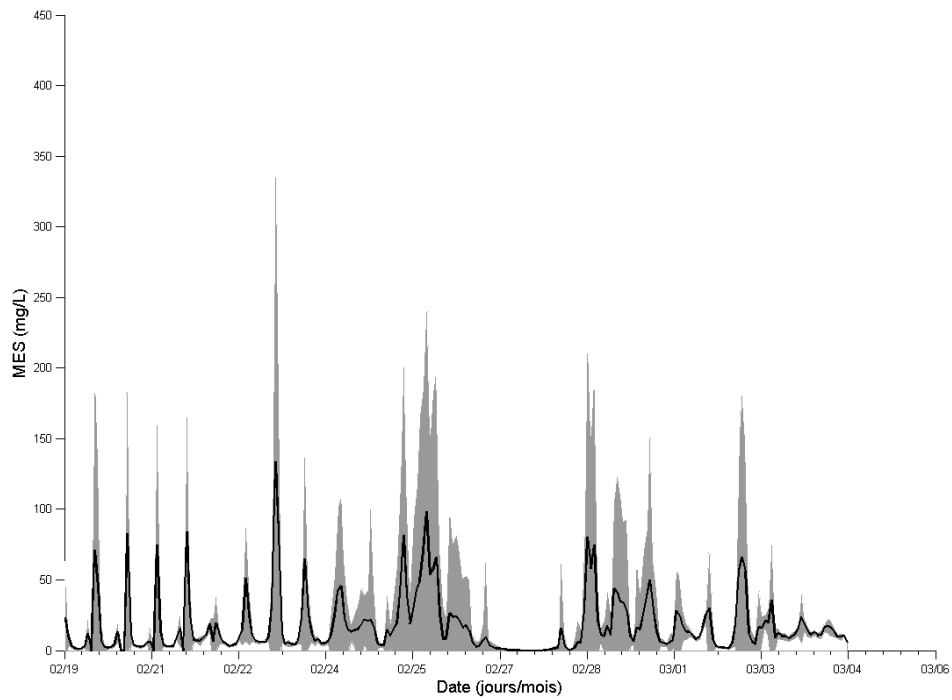


Figure IV.8 : Teneur en MES (en mg/L) mesuré sur la zone d'étude de la baie du Mont Saint-Michel du 19 février 2007 au 5 mars 2007 par l'ADV situé dans l'allée (tracé noir) ; l'enveloppe grise représente la variabilité (écart-type) de la mesure.

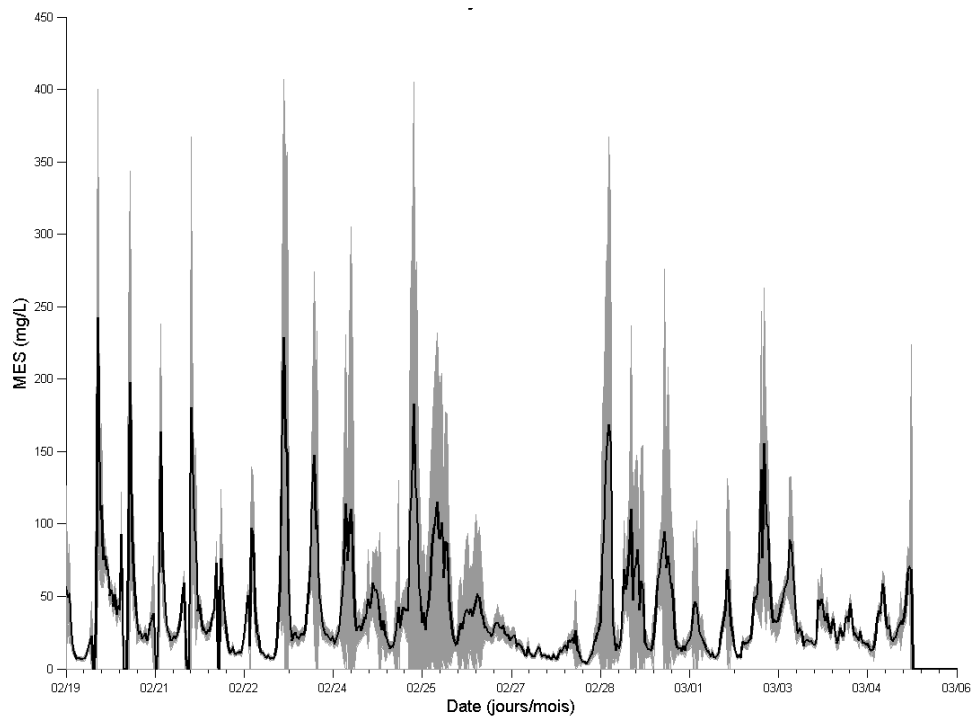


Figure IV.9 : Teneur en MES (en mg/L) mesuré sur la zone d'étude de la baie du Mont Saint-Michel du 19 février 2007 au 5 mars 2007 par l'ADV situé sous la table (tracé noir) ; l'enveloppe grise représente la variabilité (écart-type) de la mesure.

Cependant, la comparaison entre les deux appareils montre que la turbidité ambiante mesurée sous la table est plus forte que celle mesurée dans l'allée, quel que soit le moment de la marée. La figure V.10 présente la différence moyenne entre les turbidités mesurées par les deux ADV, ainsi que l'écart-type de cette différence moyenne :

Différence moyenne : 
$$\bar{X} = \overline{X_{ADV1}} - \overline{X_{ADV2}}$$

Ecart-type : 
$$\sigma = \sqrt{\sigma_{ADV1}(\bar{X})^2 + \sigma_{ADV2}(\bar{X})^2}$$

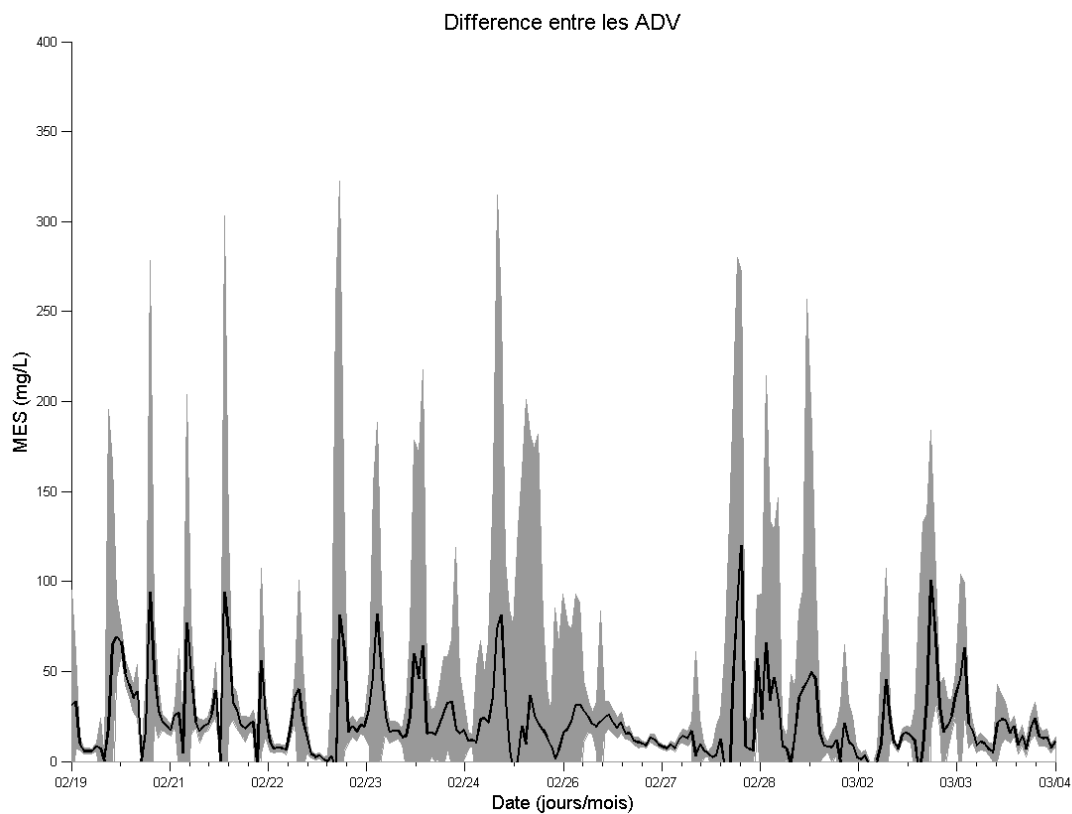


Figure IV.10: différence moyenne entre les teneurs en MES (en mg/L) mesurées par l'ADV sous la table et l'ADV dans l'allée (tracé noir); l'enveloppe grise représente l'écart-type de cette différence.

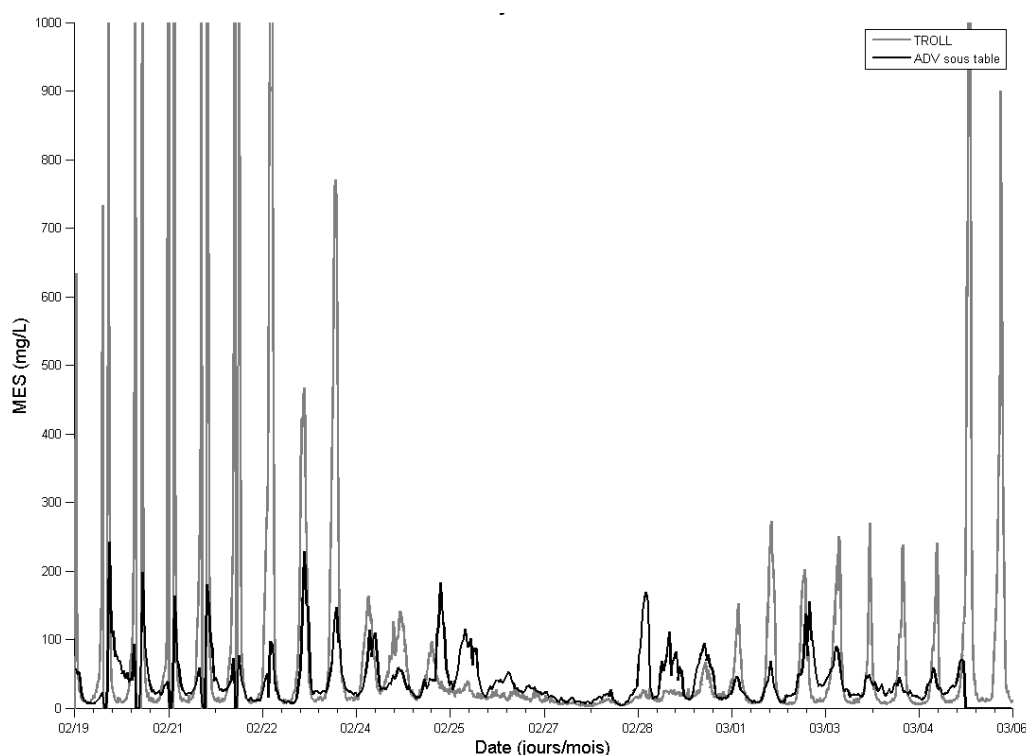
Cette différence oscille entre 0 et 100 mg.l<sup>-1</sup> avec un écart type pouvant atteindre 300 mg.l<sup>-1</sup>.

Cette différence peut avoir une origine « physique » : elle peut être imputée à la présence plus importante de biodépôts sous la table. Ces biodépôts peuvent d'ailleurs fausser la réponse acoustique de l'ADV qui n'a pas été calibré avec la taille d'un sédiment aussi complexe du point de vue de sa constitution.

Il est néanmoins difficile de déterminer l'origine exacte de cette différence: elle peut aussi être due à l'hypothèse que l'on fait de prendre la même courbe de calibrage

pour les deux ADV ; d'autant plus que l'incertitude sur la mesure est très forte pour ces taux de MES (entre 0 et 50 mg.L<sup>-1</sup>). Rappelons que la mesure de turbidité par ADV n'est qu'une indication, elle n'est pas la finalité première de cet appareil. Notons quand même que la rétrodiffusion acoustique est très utilisée, avec succès, depuis quelques années (Lynch et al., ; Thorne et al., 1991; Hay et al., 1992; Thevenot and Kraus, 1993; Vincent and Downing, 1994; Kawanisi and Yokosi, 1997; Thorne and Hanes, 2002; Hosseini et al., 2006; Betteridge et al., 2008; Ha et al., 2009). L'ADV, du fait de son insensibilité à la taille de particules, s'avère même être l'un des instruments les plus appropriés pour mesurer la concentration de MES dans le cadre d'agglomération de sédiments (Fugate and Friedrichs, 2002).

D'autres études plus approfondies sont alors nécessaires afin d'aller plus loin sur cette question.



*Figure IV.11: taux de MES (en mg/L) mesuré en baie du Mont Saint-Michel du 19 février 2007 au 5 mars 2007. Le tracé noir présente la mesure de l'ADV et le tracé gris présente la mesure de la Troll, tous deux situés sous la table.*

La comparaison entre la teneur en MES mesurée grâce à l'ADV et celle mesurée avec la sonde Troll (figure IV.11), tous les deux placés sous la table, ne traduit pas la même dynamique : la Troll met en avant l'action des courants de marées avec de très fortes teneur en MES lors des flots et des jusants de vives-eaux (valeurs dépassant 2 g.L<sup>-1</sup>), tandis que l'ADV est plus sensible lors des épisodes de vagues (avec toutefois une variabilité de la mesure beaucoup plus importante).

Il est difficile dans ce cadre de déterminer quel appareil fournit la « meilleure » estimation du taux de matières en suspension. La nature du sédiment peut varier temporellement et ainsi modifier la teneur en MES de la colonne d'eau en incorporant des particules de tailles différentes de celles utilisées lors des différents calibrages.

Les épisodes de vagues peuvent en effet transporter du sable ayant une granulométrie différente de nos prélèvements ou même générer des intensifications des processus de fragmentation des particules en suspension, issues de la biodéposition ou non. Des tests en laboratoire (Burt & Stevenson, 1986 ; Shutler et al., 1993 ; Fettweis et al., 1998) ont montré que les instruments optiques (une CTD dans leur cas) ignoraient la fraction sableuse de la colonne d'eau. Ce qui expliquerait la meilleure prise en compte de la dynamique de turbidité liée aux vagues par les ADV.

Une prise en compte de la présence de bulles liées à l'action des vagues serait également nécessaire.

## *IV.2. Contrainte critique de cisaillement vs hydrodynamique à moyenne échelle*

Dans le chapitre II (partie 2), nous avons montré que l'impact des installations ostréicoles sur les vagues était significatif à l'échelle du parc. La réduction des hauteurs significatives de vagues a pour effet d'entraîner une diminution des contraintes de cisaillement sur le fond induites par les vagues. Cette diminution peut se traduire par une baisse des flux d'érosion des sédiments sur et à proximité de la zone ostréicole ; ce qui pourrait expliquer une partie des envasements locaux observés.

Afin de relier les mesures hydrodynamiques (diminution des contraintes sur le fond dues aux vagues) à la dynamique sédimentaire en présence (érosion ou non du sédiment), il convient de connaître en premier lieu l'érodabilité des sédiments superficiels, c'est-à-dire les conditions de forçages hydrodynamiques à partir desquelles ces sédiments sont susceptibles d'être remaniés.

L'érosion d'un sédiment est liée à la contrainte de cisaillement au niveau eau/sédiment engendrée par les forçages hydrodynamiques, ainsi qu'aux caractéristiques propres du sédiment.

En fonction de toutes ces caractéristiques, un seuil d'érosion peut apparaître et on parle alors de « contrainte critique de cisaillement », valeur à partir de laquelle le sédiment peut être érodé et remis en suspension.

Cette contrainte critique dépend surtout de la cohésion des sédiments (Mehta, 1988; Mitchener and Torfs, 1996; Black and Paterson, 1997; Mehta and Parchure, 2000; Tolhurst et al., 2000; Le Hir et al., 2005) laquelle est intimement liée à leur granulométrie et à d'autres paramètres physiques et chimiques propres (Cann, 2009). (Migniot, 1989; Le Hir et al., 2008) soulignent que le caractère cohésif des sédiments est aussi fortement lié à leur teneur en matière organique ainsi qu'à la composition minéralogique argileuse de la vase.

Nous considérerons dans la suite deux grandes classes de sédiments : les sables et les vases ; les sables étant formés de grains de taille supérieure à 62.5  $\mu\text{m}$  et les vases (silts et argiles) étant des particules fines de taille inférieure à cette valeur.

Nous avons tout d'abord procédé à une analyse granulométrique et à une teneur en eau de sédiments superficiels (premier millimètre) prélevés à l'intérieur et à proximité du nouveau parc ostréicole de la baie du Mont Saint-Michel (figure IV.12), afin connaître la composition de notre sédiment et de relier cette composition à une contrainte critique de cisaillement (cf partie IV.2.2).

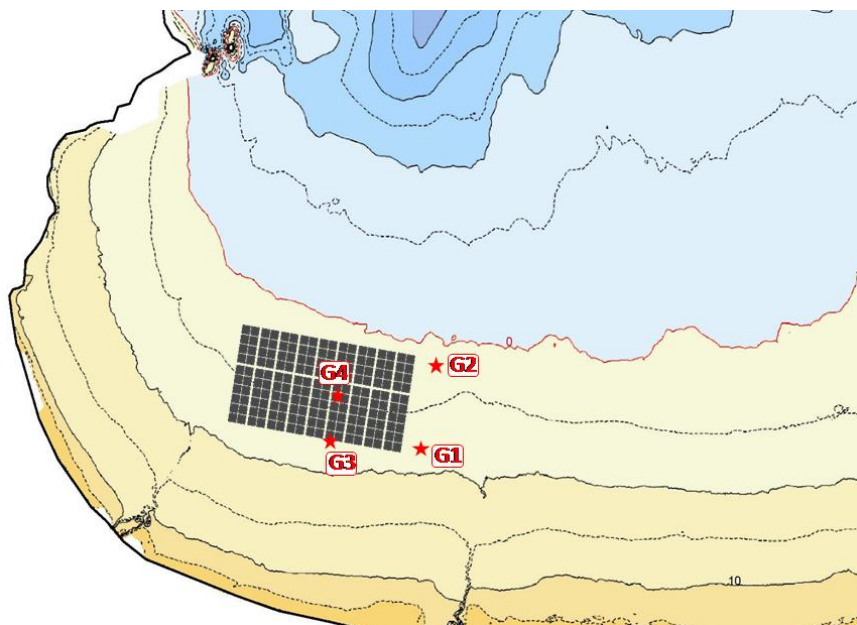


Figure IV.12: Stations de prélèvement de sédiment superficiel en baie du Mont Saint-Michel, mars 2007.

#### IV.2.1. Analyse granulométrique

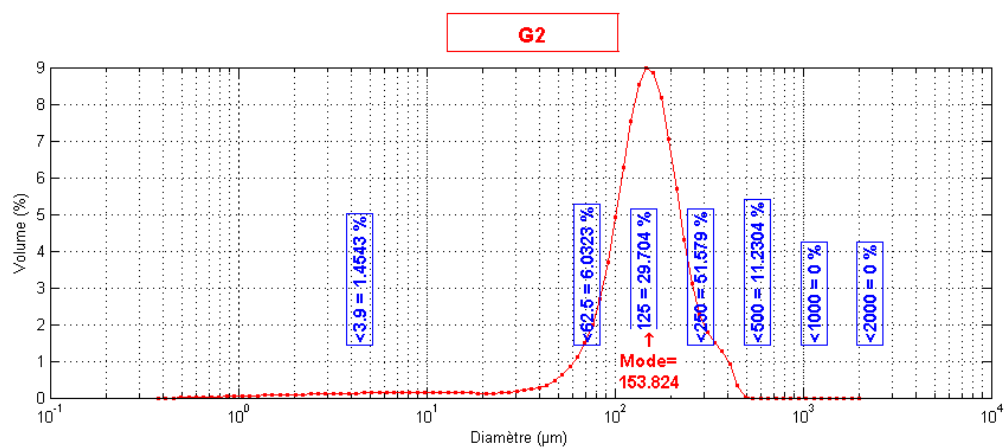
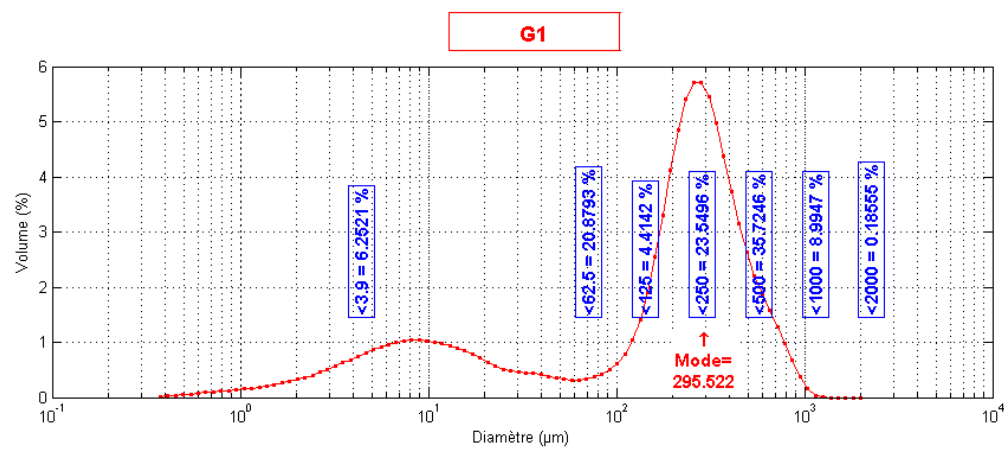
	Teneur en eau (%)	Concentration sèche (g/L)	D <sub>50</sub> (μm)	% de vase
G1	83	820	235	27
G2	45	1210	154	7
G3	97	755	80	47
G4	36	1298	284	7

Tableau IV.1 : Caractéristiques des sédiments prélevés en baie du Mont Saint-Michel

L'analyse est réalisée à l'aide d'un micro-granulomètre laser COULTER LS 2000. Cet appareil nous donne une distribution volumique fine des différentes classes de taille de sables et de vases de 0.4 à 2000 μm (principe de la diffraction laser des particules en suspension).

D'autre part, au retour de mission, les sédiments prélevés dans des piluliers sont pesés. Ils sont ensuite placés pendant 10 jours dans une étuve à 50 °C. La pesée de l'échantillon après ce séchage nous donne la teneur en eau et la concentration sèche de chaque échantillon : la teneur en eau est la masse d'eau évaporée rapportée à la masse de sédiment sec (en %), la concentration en matière sèche est déterminée à partir de la masse de sédiment sec, en connaissant le volume du pilulier (en g/l).

Le spectre de taille des particules pour chaque point de prélèvement ainsi qu'une photographie de chaque site de prélèvement sont présentés en figure IV.13.





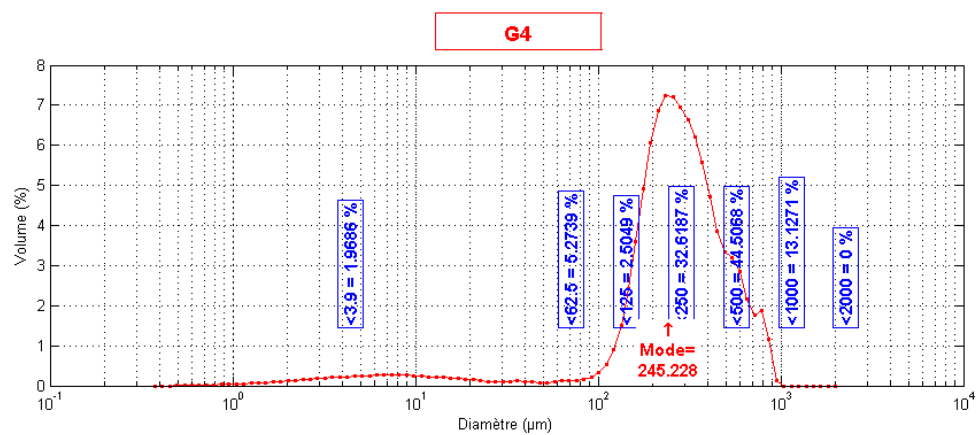
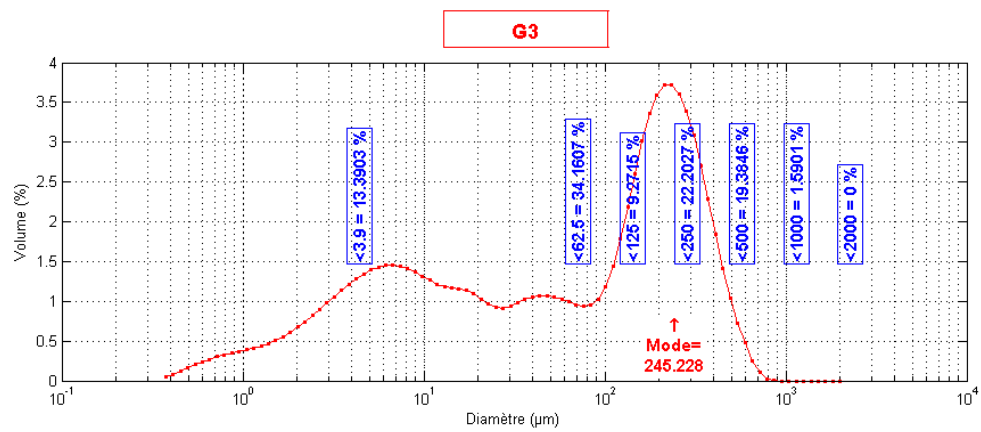


Figure IV.13: spectre granulométrique et photographie du site pour chaque point de prélèvement.

Ces différentes mesures (tableau IV.1) montrent que plus le pourcentage de vase est élevé, plus la teneur en eau est forte et plus la concentration sèche est au contraire faible. En effet, au niveau de la concentration sèche, la masse du matériel sableux est plus élevée que celle du matériau vaseux. En ce qui concerne la teneur en eau, celle-ci est plus importante dans les vases (attention, le poids sec des vases est plus faible et augmente donc ce rapport) : dans les vases, en plus de l'eau interstitielle, on retrouve aussi de l'eau adsorbée ainsi que de l'eau de constitution.

Les points situés plus bas sur l'estran sont plus sableux (7 % de vase) que les points situés au niveau haut du parc ostréicole (points G3 et G1, respectivement 47 % et 27 % de vase).

Bien que cette tendance soit typique des conditions naturelles d'un estran tidal (diminution de la taille des sédiments vers le haut avec l'amortissement de la vitesse des courants de marée), il n'est pas rare que celle-ci soit perturbée localement par l'impact de la conchyliculture. Dans notre cas d'étude, elle reflète bien les observations réalisées sur le terrain : une « langue » de vase présente depuis Cancale jusqu'à l'ouest du parc, se prolonge dans les deux premières rangées de tables en partie haute du parc (emprise cross-shore de l'envasement : 150-200 m).

Il faut noter qu'avant l'installation de ce parc, des bouchots mytilicoles se trouvaient à son emplacement et présentaient déjà un envasement, mais moins prononcé.

La différence de fraction vaseuse entre les points G3 (situé à l'intérieur du parc, à 20 m de son extrémité sud) et G1 (situé à la même latitude mais à 100 m à l'est du parc), respectivement 47 % et 27 % de vase, que l'on retrouve nettement sur l'allure des spectres granulométriques (figure IV.13), pourrait donc être imputée à la propagation de cette langue vaseuse venue de l'ouest mais aussi à la présence des tables à huîtres.

Notons aussi que, comme le montre la photographie du site G3 (figure IV.13), l'épaisseur de vase est bien plus importante en G3 qu'en G1 : jusqu'à 20 cm en G3 pour 2 à 5 cm en G1.

#### IV.2.2. Calcul de la contrainte critique de cisaillement

Nous connaissons maintenant la composition granulométrique des sédiments de notre site d'étude (et donc leur teneur en vase) et nous voulons déterminer la contrainte critique de cisaillement susceptible d'éroder ces sédiments. Les installations ostréicoles entraînant une diminution des contraintes sur le fond, il se peut en effet que ce seuil critique soit moins souvent atteint dans la zone de culture qu'à proximité.

Parmi d'autres, (Le Hir et al., 2005) ont montré qu'il existait une relation entre la fraction vaseuse d'un sédiment et la contrainte critique de cisaillement pour son érosion (contrairement à (van Ledden et al., 2004) qui mettaient en avant la dépendance vis-à-vis de la fraction argileuse).

Pour ce faire, ils ont utilisé, sur des sédiments mixtes prélevés en baie du Mont Saint-Michel, un appareil permettant d'estimer l'érodabilité d'un sédiment : l'érodimètre (Ifremer). Le schéma de principe de cet appareil est présenté en figure IV.14. Les échantillons de sédiments sont prélevés par carottage et sont ensuite introduits dans l'érodimètre. Ils sont alors soumis à un forçage obtenu par une circulation de courant dont on peut faire varier l'intensité. Le flux d'érosion des particules fines est estimé à partir de la turbidité, alors que celui des sables est déduit des quantités récupérées par le piège à sable situé en aval de l'échantillon (pour une description détaillée, voir (Cann, 2009)).

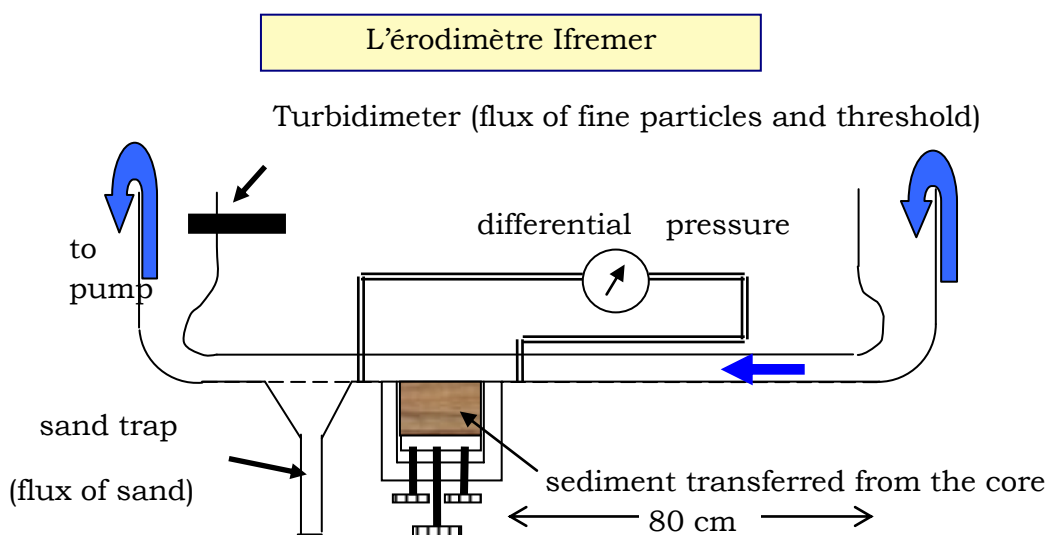


Figure IV.14: Schéma de principe du fonctionnement de l'érodimètre, d'après (Cann, 2009).

La relation entre cette contrainte critique et la fraction vaseuse est présentée en figure IV.15.

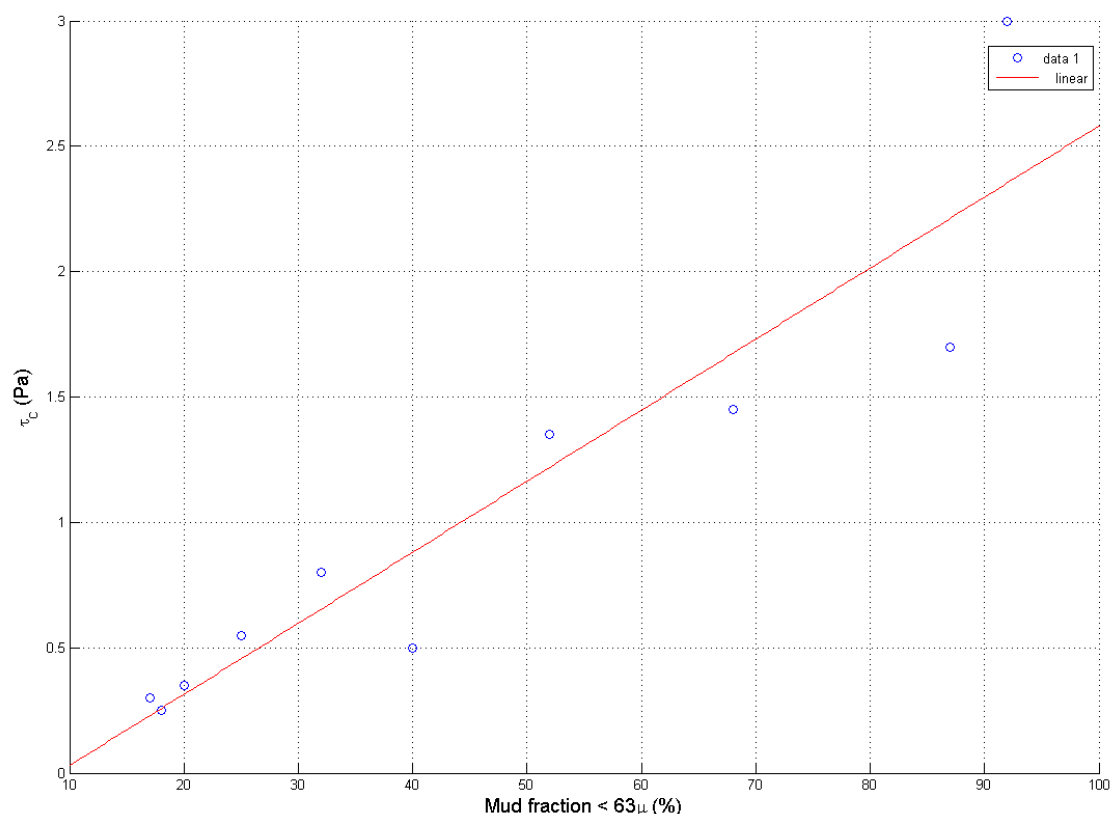


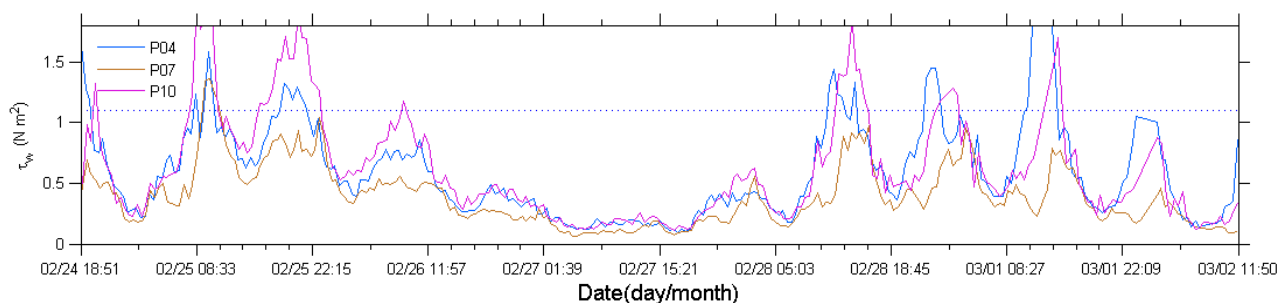
Figure IV.15: Seuil d'érosion de sédiments mixtes de la baie du Mont Saint-Michel en fonction de la fraction vaseuse, d'après (Le Hir et al., 2005).

La fraction vaseuse en G3 (c'est-à-dire en P7 lors de nos mesures de vagues, cf partie II.2.1) est de 47 % ; ce qui correspond à partir des expériences de Le Hir et al. (2005) à une contrainte critique de cisaillement d'environ 1.1 Pa. A partir du moment où la contrainte de cisaillement sur le fond mesurée à cet endroit excède cette valeur seuil, le sédiment est capable d'être érodé et remis en suspension dans la colonne d'eau.

#### IV.2.3. Atténuation de la tension de cisaillement par les structures et conséquences

Dans le chapitre II, nous avons mesuré des atténuations significatives des vagues par le parc ostréicole, notamment en P7. Les vagues étant le forçage hydrodynamique majeur dans cette partie de la zone d'étude de la baie du Mont Saint-Michel (cf article « The impact of oyster structures on hydrodynamics in a macro-tidal environment »), les contraintes de cisaillement sur le fond induites par

les vagues tiennent une place prépondérante. Ces contraintes sont fortement atténuées par la présence du parc (figure IV.16).



*Figure IV.16: Contrainte de cisaillement sur le fond induite par les vagues sur la radiale long-shore située au sud du parc ostréicole (haut de l'estran). La ligne pointillée représente le seuil critique d'érosion de 1.1 Pa.*

En regardant les valeurs de contraintes de cisaillement sur le fond le long de la radiale long-shore située en haut du parc (enregistrées pendant une durée de 1 mois), nous constatons que le seuil critique d'érosion de nos sédiments de 1.1 Pa est dépassé 103 fois (soit 9.1 % du temps de l'enregistrement) à l'ouest du parc (capteur P4), 98 fois (soit 8.7 % du temps de l'enregistrement) à l'est du parc (capteur P10) et seulement 33 fois (soit 2.8 % du temps de l'enregistrement) au sud du parc, soit en aval vis-à-vis de la propagation des vagues (capteur P7).

Nous voyons donc que les contraintes de cisaillement sur le fond sont fortement atténuées par le parc ostréicole, et par suite les flux d'érosion en haut des parcs vont être très diminués par rapport à une absence de ces parcs. Les sédiments auront donc plus tendance à rester au même endroit (à ne pas être remaniés) dans la zone ostréicole qu'à proximité.

Ajoutée à l'atténuation à moyenne échelle des courants par le parc relatée dans le chapitre III, cette conclusion vient confirmer que le parc joue un rôle dans le phénomène d'envasement « local » observé dans les 2 premières rangées en haut du parc.

### IV.3. Impact local des structures sur l'altimétrie du sédiment

Afin d'essayer de comprendre l'effet local d'une table à huître sur l'altimétrie du sédiment (processus d'érosion et de dépôt), nous avons placé un altimètre ALTUS (Jestin et al., 1998; Bassoullet et al., 2009) au cœur du bassin de Marennes-Oléron, dans le cadre d'une campagne expérimentale faisant partie intégrante du chantier PNEC littoral Atlantique.

Ce site a été choisi car il présente la particularité de pouvoir mesurer des taux d'accrétion (ou d'érosion) bien plus élevés qu'en baie du Mont Saint-Michel par exemple.

#### IV.3.1. Contexte et stratégie de l'étude

Le chantier PNEC littoral Atlantique est une action pilotée par le CRELA/LER-PC, avec un appui de DYNECO-Ifremer Brest, qui a été initiée afin de comprendre l'évolution naturelle du sédiment en Baie de Marennes-Oléron et de valider le modèle hydrosédimentaire du bassin. Une série d'instruments de mesures autonomes (« plate-forme technique ») a été mise en place en avril 2007 en 7 sites du bassin répartis transversalement, ces appareils ayant fonctionné en continu et *in situ* pendant 1 an jusqu'en avril 2008. Cela a permis d'enregistrer, pendant une saison complète, essentiellement la marée, les vagues et les évolutions sédimentaires. D'autre part, *quasi* mensuellement, des prélèvements ponctuels ont été effectués afin d'en déduire la nature texturale et le comportement mécanique de ces sédiments.

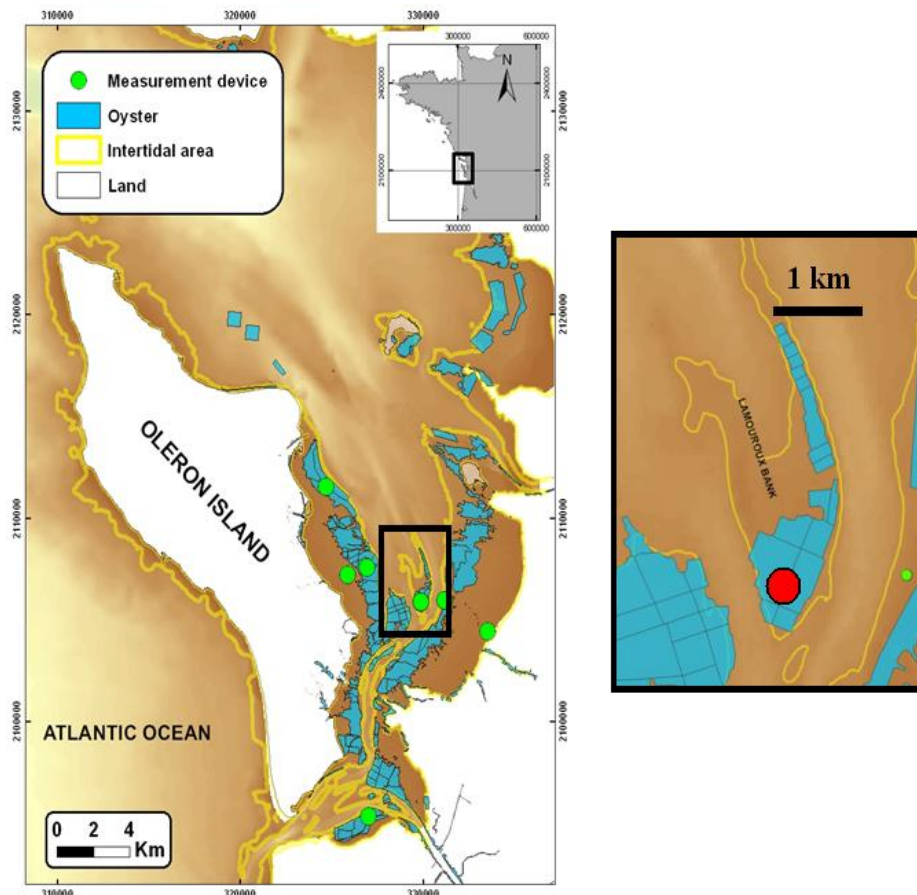


Figure IV.17: Emprises conchyliques et appareils de mesures dans le bassin de Marennes-Oléron (à gauche) et localisation des altimètres ALTUS sur le banc de Lamouroux (à droite), d'après (Kervella et al, 2010b).

Parallèlement à ce chantier PNEC, dans le cadre du projet PISTOLE et donc de la thèse, nous avons choisi de placer un altimètre supplémentaire sur le banc de Lamouroux, au centre du bassin de Marennes-Oléron (figure IV.17). Ce banc, très productif (utilisé par les professionnels pour la dernière phase de croissance avant la commercialisation) et représentatif de l'activité ostréicole (les 2/3 du banc sont occupés par des tables), est assujéti à une réglementation d'enlèvement des concessions (arrêté préfectoral n°18 en date du 22 décembre 2006): les structures sont mises en place au mois de juin et sont enlevées à la fin du mois de novembre (l'enlèvement est obligatoire fin février mais les ostréiculteurs préfèrent enlever les structures plus tôt afin d'éviter les tempêtes hivernales). Avant la mise en place, le banc est nettoyé « mécaniquement » à l'aide d'un cercle métallique. Cette mesure a été prise afin d'éviter un envasement trop important de la zone.

L'objectif de cette étude est de :

- Lier les variations altimétriques de l'interface sédimentaire avec les forçages hydrodynamiques en présence (impact relatif des vagues et des courants)



- Comprendre l'effet de la présence des installations ostréicoles sur l'altimétrie du sédiment (éventuel différentiel sous table/hors table)

Le banc de Lamouroux est donc équipé de 2 altimètres :

- L'Altus n°8, fixé à une table à huîtres, mesurant l'altimétrie du sédiment sous la table
- L'Altus n°4, situé à l'extrémité de cette table à huîtres, près d'une allée de circulation professionnelle.

D'autre part, un courantomètre à effet Doppler (ADV) a été installé près de l'Altus n°4 (figure IV.18).

Des prélèvements mensuels de l'interface (0-2 cm) ont aussi été réalisés afin de caractériser d'un point de vue sédimentologique et mécanique les sédiments à proximité des appareils de mesure.

Tous ces résultats, accompagnés de relevés bathymétriques à haute résolution de la partie ostréicole du banc, ont donné lieu à une présentation sous forme de poster au salon de l'ostréiculture 2009 (cf annexe).

#### Caractéristiques des appareils de mesure :

Appareil	Fréquence de mesure	Longueur des bursts	Cadence des bursts	Précision de la mesure	Seuils pour altimétrie
ALTUS	2 Hz	521 mesures (soit 4mn20s)	20 mn	+/- 8 cm	90, 45 et 25 mV
ADV	4 Hz	2084 mesures (soit 8mn40s)	14 mn	Entre 1 et 5 mm.s <sup>-1</sup>	

#### Dates des enregistrements :

- Altus n°4 : juin 2007 => mars 2008
- Altus n°8 : juillet 2007 => février 2008
- ADV : novembre 2007 => décembre 2007



Figure IV.18: Appareils de mesures sur le Banc de Lamouroux, bassin de Marennes-Oléron.

Il faut cependant noter que l'Altus n°4, situé en bout de table, est influencé par la présence de cette table et n'est donc pas réellement représentatif d'une situation « sans table ».

### IV.3.2. Caractéristiques des sédiments et altimétrie

#### IV.3.2.1. Caractéristiques des sédiments superficiels :

Les caractéristiques sédimentaires des 2 sites de mesures (Altus n°4 en bout de table et Altus n°8 sous table) sont résumées sur la figure IV.19. Cette étude sédimentaire a été réalisée par Stéphane Kervella (Ifremer LER PC) dans le cadre de sa thèse (Kervella, 2010a).

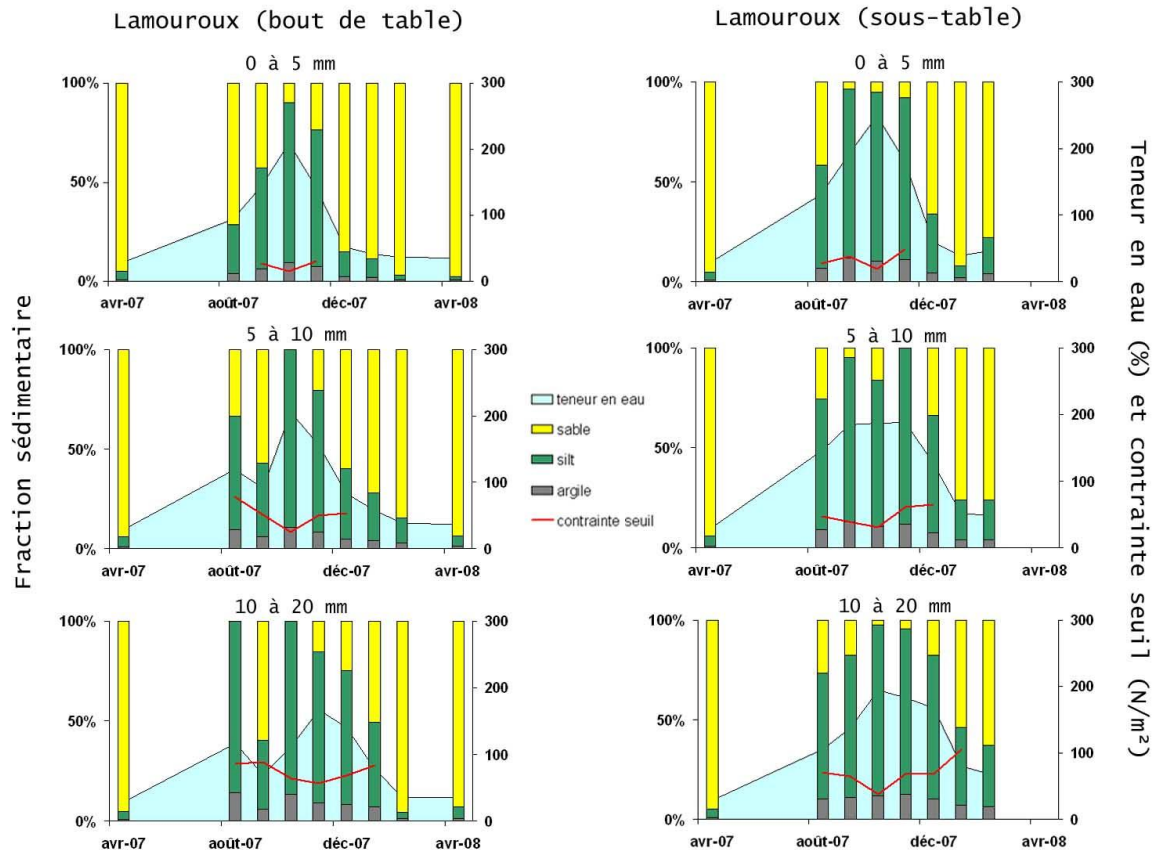


Figure IV.19: Variations des paramètres sédimentaires (% de sable, silt et argile) et rhéologiques (seuil d'écoulement) des sédiments de surface (0 à 5 mm, 5 à 10 mm et 10 à 20 mm de profondeur) en bout de table et sous une table ostréicole, sur le banc de Lamouroux, entre avril 2007 et avril 2008. D'après (Kervella, 2010a).

Les résultats montrent une variation saisonnière au niveau des faciès sédimentaires :

Avant l'installation des tables, les sédiments de surface sont essentiellement sableux (moins de 5 % de particules fines, les fines étant ici définies comme étant les particules dont le diamètre est inférieur à 50  $\mu\text{m}$ ).

A partir du mois de juin, époque de l'installation des structures et des poches remplies d'huîtres ainsi que d'un affaiblissement des agitations (période estivale), une augmentation très rapide de la fraction fine dans les sédiments superficiels est observée. Le maximum de fraction fine est atteint en septembre sous les tables, au niveau de l'Altus n°8, alors qu'il est atteint un mois plus tard en bout de table, près de l'Altus n°4.

L'évolution de l'envasement est donc plus rapide sous les tables. La sédimentation inhérente aux tables semble se propager aux zones adjacentes avec un certain délai de transport.

Le premier centimètre de sédiments est alors composé de 12 % d'argile et 85 % de silt, avec une teneur en eau de 190 %.

La composition des sédiments superficiels reste la même jusqu'à la fin du mois de novembre, avec quelques variations au niveau de l'Altus n°4.

Début décembre, les tables à huîtres sont enlevées et deux violentes tempêtes affectent la zone (cf partie IV.3.3).

L'interface redevient alors sableuse (66 % de sable pour l'Altus n°8 et 85 % de sable pour l'Altus n°4) et reste ainsi jusqu'à la fin de l'hiver (fin des prélèvements respectivement en février et en avril sous la table et en bout de table).

#### IV.3.2.2. Variations altimétriques de l'interface sédimentaire (figure IV.20):

- Altus n°4, en bout de table :

La phase d'envasement commence en juillet. La hauteur maximale de sédiment est atteinte début novembre, avec une accrétion de l'ordre de 40-50 mm, soit une vitesse moyenne d'envasement de 10 mm/mois.

Le 13 novembre, une algue coincée dans la structure de l'Altus entraîne un affouillement sous le capteur, ce qui se traduit par une érosion de plus de 50 mm de sédiment. L'algue est enlevée et la sédimentation reprend son cours.

Début décembre, alors que les poches à huîtres viennent d'être enlevées, des vagues importantes touchent le bassin de Marennes-Oléron, ce qui se traduit au niveau de l'Altus n°4 par une érosion de 40 mm de sédiment. Un niveau altimétrique inférieur à celui de départ est atteint. L'interface est alors sableuse.

Les variations altimétriques sont ensuite faibles jusqu'à fin mars (hormis une petite érosion liée à un épisode de vagues en mars).

- Altus n°8, sous la table :

Le capteur est installé en juillet alors que 40 mm de vase sont déjà présents sous la table.

L'envasement est progressif jusque fin novembre avec une variation altimétrique positive de l'interface de 60-70 mm, soit une vitesse d'envasement de 15 mm/mois.

Début décembre, les tempêtes affectent la quasi-totalité du dépôt vaseux, avec une érosion mesurée par l'Altus de l'ordre de 90 mm. L'interface est alors sableuse et est au même niveau que le niveau de départ. La couche de vase semble avoir protégé cette interface sableuse, contrairement à l'Altus n°4.

Comme dans le cas de l'Altus situé en bout de table, les variations altimétriques sont très faibles ensuite, jusqu'à fin février.

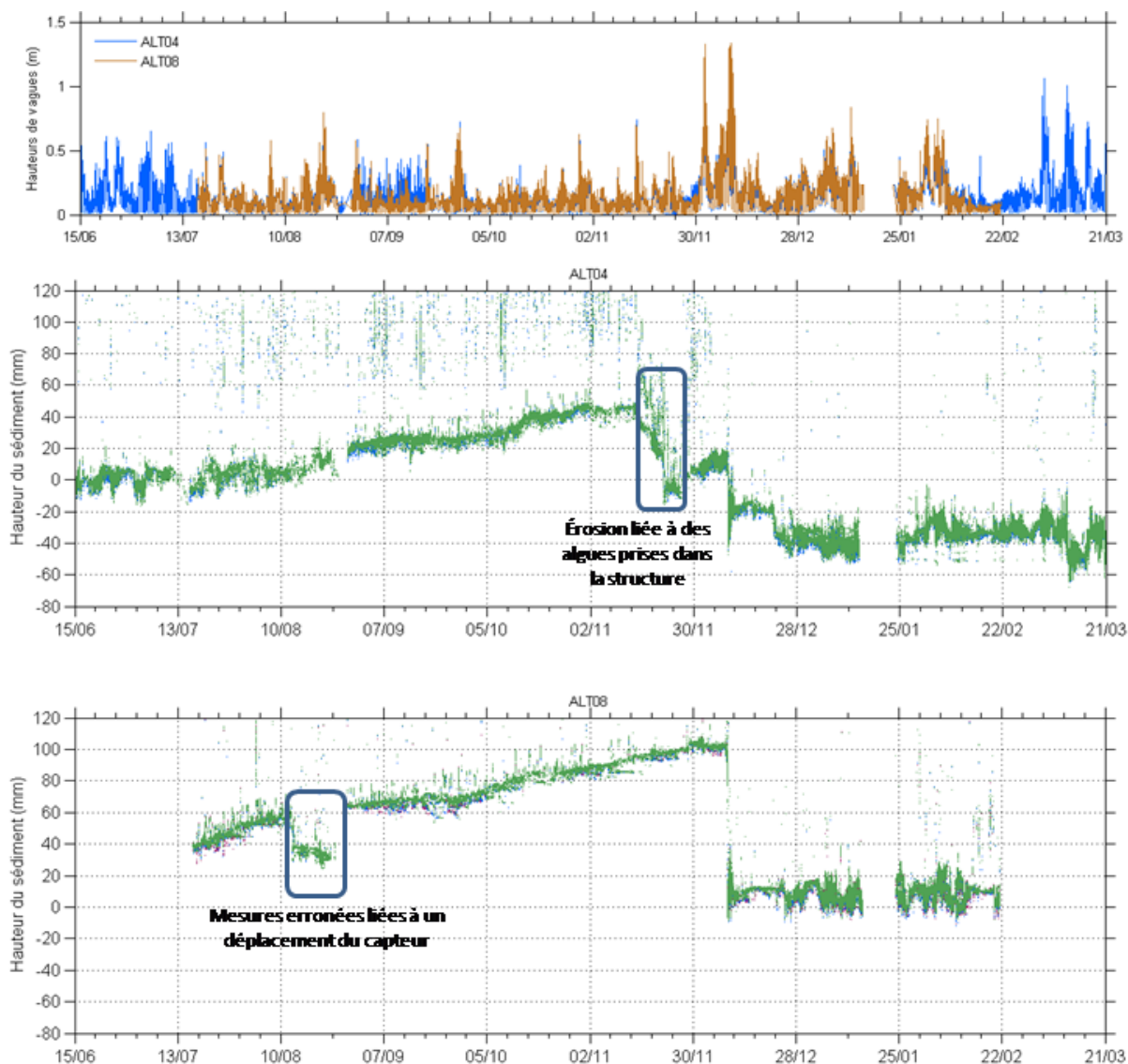


Figure IV.20: Hauteurs significatives de vagues pour l'Altus n°4 et l'Altus n°8 (en haut) et variations altimétriques de l'interface eau/sédiment en bout de table (Altus n°4, au milieu) et sous table (Altus n°8, en bas) du 15 juin 2007 au 21 mars 2008, banc de Lamouroux, Marennes-Oléron.

L'impact réel des structures ostréicoles sur l'altimétrie du sédiment est donc difficilement détectable dans le cadre de notre étude, les 2 appareils de mesure étant en effet plus ou moins sous l'influence de ces structures. Néanmoins, on peut noter une évolution très « propre » de l'altimétrie en période d'envasement, sous la table. Les tables joueraient alors un rôle de « protection » des sédiments déposés vis-à-vis des vagues, jusqu'à un certain point.

En effet, au cours des dix premiers jours du mois de décembre 2007, deux violentes tempêtes ont frappé le littoral charentais, et la baie de Marennes-Oléron. Ces tempêtes ont provoqué l'érosion d'une partie du dépôt estival précédemment évoqué.

Les causes de cette érosion ainsi que l'effet de la présence des structures ostréicoles ont donné lieu à une présentation à la conférence INTERCOH 2009 (10th International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes) qui s'est déroulée au Brésil du 3 au 8 mai 2009 :

### **Storm effects on stability of cohesive sediments in an oyster farming area**

S. Kervella<sup>a\*</sup>, Y. Kervella<sup>b,d</sup>, S. Robert<sup>a</sup>, R. Verney<sup>b</sup>, P. Le Hir<sup>b</sup>, A. Pantet<sup>c</sup>

<sup>a</sup> IFREMER, LERPC, Place Gaby Coll, BP5, 17137 L'Houmeau, France.

<sup>b</sup> IFREMER, DYNECO/PHYSED, BP 70, 29280 Plouzané, France.

<sup>c</sup> LEA, Université de Poitiers, ENSMA, CNRS, boulevard Marie et Pierre Curie 86962 Futuroscope Chasseneuil

<sup>d</sup> Laboratoire M2C Université de Caen-Basse Normandie, CNRS/INSU UMR 6143, 2-4 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France

Une publication est actuellement en préparation.

## Ce qu'il faut retenir de l'impact des structures ostréicoles sur les sédiments

### ➤ En champ proche :

- Turbidité : la comparaison entre les turbidités ambiantes sous une table et dans une allée entre deux tables indique un taux de matières en suspension plus important sous la table, avec néanmoins l'impossibilité, sans études plus approfondies, de quantifier cette différence et de déterminer sa provenance.

- Altimétrie : la comparaison à haute fréquence et sur plusieurs mois de l'altitude du sédiment sous une table à huîtres et au voisinage d'une table à huîtres révèle une évolution moins perturbée de l'altimétrie sous la table, en période d'envasement. Les tables joueraient alors un rôle de « protection » des sédiments déposés vis-à-vis des forçages hydrodynamiques en présence.

### ➤ A l'échelle du parc :

- Contrainte de cisaillement : les mesures in-situ révèlent que les contraintes de cisaillement sur le fond exercées par les vagues sont fortement atténuées par le parc ostréicole. Par suite, et de par la nature sédimentaire du fond, les flux d'érosion en haut des parcs vont être très diminués par rapport à une situation d'absence de ces parcs.

Ajoutée à l'atténuation à moyenne échelle des courants par le parc, cette conclusion vient confirmer l'hypothèse qu'un parc ostréicole joue un rôle dans le phénomène d'envasement « local » observé dans ou à proximité des installations.

Notons aussi que toutes les altérations de l'hydrodynamisme ambiant inhérentes aux parcs ostréicoles, relatées dans les précédents chapitres, peuvent avoir un effet sur la dynamique sédimentaire locale ou globale.





# Chapitre V: Vers une modélisation numérique à l'échelle d'une baie

Contenu :

**Modèle courantologique**

**Modèle de vagues**

**Modèle de transport sédimentaire**

**Résultats**

Prendre en compte l'impact des installations ostréicoles sur l'hydrodynamique dans un modèle de grande emprise spatiale, nécessite un travail de réflexion approfondi ; pour se faire, il faut utiliser des techniques de changement d'échelles complexes.

Néanmoins, nous avons mesuré un impact significatif des installations à l'échelle du parc, sur les vagues et sur les courants. Nous nous proposons donc, en première approche, de reproduire cet impact dans des modèles numériques de vagues et de courants par le biais d'un frottement sur le fond adapté.

Au vu des nombreuses données *in-situ* dont nous disposons en baie du Mont Saint-Michel (chapitres 3 et 4), que ce soit en termes de mesures de vagues ou de courants, nous choisissons d'appliquer un modèle hydro-sédimentaire développé à l'Ifremer, à cette baie pour étudier à son échelle l'impact des installations ostréicoles.

Dans un premier temps, les mesures de courants effectuées en 2009 autour du parc ostréicole (chapitre III partie 2) servent à paramétrer un modèle courantologique, en prenant en compte la présence des structures.

Ensuite, un modèle de vagues est calibré avec les mesures effectuées en 2007 (chapitre II partie 2). Une rugosité inhomogène sur le fond est spécifiée afin de prendre en compte les structures ostréicoles.

Les forçages hydrodynamiques issus de ces deux modèles sont implémentés (via un frottement sur le fond adéquat) dans le modèle hydro-sédimentaire. Deux scénarii, avec ou sans le parc ostréicole, sont alors testés afin d'observer l'impact sédimentaire à long terme de ces structures.

## V.1. Modèle courantologique

Le modèle courantologique utilisé est le code SIAM-2DH (Brenon and Le Hir, 1999). Il calcule les élévations de surface libre et les courants associés sur la zone de notre étude. Ce modèle aux différences finies résout, grâce à un schéma A.D.I. (Leendertse and Gritton, 1971), les équations de Navier-Stokes simplifiées par les hypothèses de quasi-hydrostaticité (accélérations sur la verticale négligées par rapport aux accélérations de la pesanteur) et de Boussinesq (variations de masse volumique négligées hormis dans le terme de pression) et intégrées depuis le fond vers la surface.

L'utilisation d'un modèle bidimensionnel (une seule couche sur la verticale) est justifiée par le marnage exceptionnel de la Baie du Mont Saint-Michel, responsable d'un intense mélange sur la verticale.

### V.1.1. Equations du modèle

$$\begin{aligned}\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} &= f \cdot V - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left[ \frac{\partial(N_H \frac{\partial U}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(N_H \frac{\partial U}{\partial y})}{\partial y} \right] + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0 H} \\ \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial y} + U \frac{\partial V}{\partial x} &= -f \cdot U - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left[ \frac{\partial(N_H \frac{\partial V}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(N_H \frac{\partial V}{\partial y})}{\partial y} \right] + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0 H} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} &= 0\end{aligned}$$

$x, y$  : coordonnées cartésiennes orthogonales

$U, V$  : composantes de vitesse dans les directions  $x, y$

$H$  : hauteur d'eau

$\rho_0$  : masse volumique de l'eau

$\zeta$  : élévation de surface libre

$f$  : paramètre de Coriolis

$N_H$  : viscosité turbulente horizontale

$\tau_{sx}, \tau_{sy}$  : termes de cisaillement en surface (entraînement de l'eau par le vent).

$\tau_{bx}, \tau_{by}$  : termes de cisaillement sur le fond.

### V.1.2. Frottement sur le fond

Le frottement sur le fond peut s'exprimer en fonction de la vitesse de frottement  $u_*$ , qui représente l'intensité des mouvements turbulents :

$$\tau = \rho u_*^2$$

En supposant un profil logarithmique de la vitesse sur la colonne d'eau, la vitesse de frottement peut être calculée à partir de la vitesse moyenne sur la hauteur d'eau  $U$  :

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \ln (H/e.z_0)$$

Avec  $z_0$  longueur de rugosité du fond,  $\kappa$  constante de von Karman (= 0.4),  $H$  hauteur d'eau et  $e = e^l = 2.718$ .

Les frottements en 2D sont ainsi calculés à partir de la vitesse intégrée sur la verticale :

$$\tau_{bx} = \rho \left( \frac{\kappa}{\ln (H/e.z_0)} \right)^2 U |\overline{U}|$$
$$\tau_{by} = \rho \left( \frac{\kappa}{\ln (H/e.z_0)} \right)^2 V |\overline{U}|$$

La longueur de rugosité  $z_0$  paramétrée pour l'écoulement est définie comme une rugosité de forme. Elle nous permet donc d'intégrer la présence d'obstacles sur le fond : des installations ostréicoles dans notre cas. Notons que cette longueur de rugosité est différente de celle susceptible d'éroder le sédiment superficiel, définie comme rugosité de peau et relative à la taille des grains.

La bathymétrie (figure V.1) a été construite à partir des sources les plus récentes disponibles sur la zone (levé LIDAR de 2003 de résolution horizontale égale à 1 m, levé Ifremer de 2003 par sondeur mono-faisceau entre -4 m et -22 m avec profils espacés de 200 m et cartes du SHOM pour les zones non couvertes par les levés) qui ont permis la réalisation d'un modèle numérique de terrain au pas de 100 m.

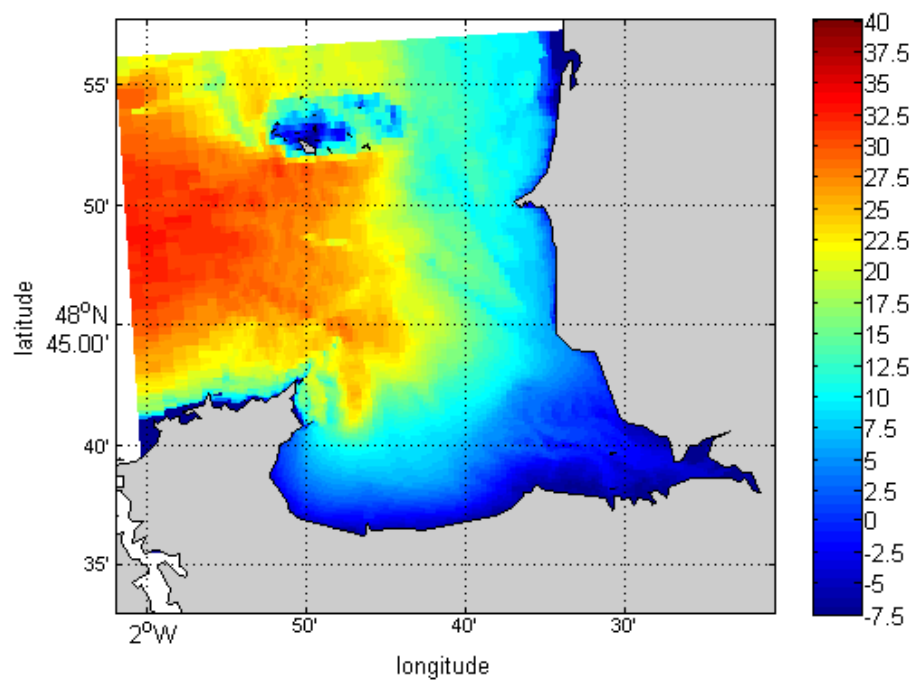


Figure V.1 : Bathymétrie. Les hauteurs d'eau se réfèrent au zéro hydrographique.

La résolution spatiale du maillage (cartésien irrégulier) varie de 200 m à 500 m (figure V.2). Notons que la zone où se trouve le parc ostréicole (partie sud-ouest de la Baie) présente des mailles carrées de 200 m de côté.

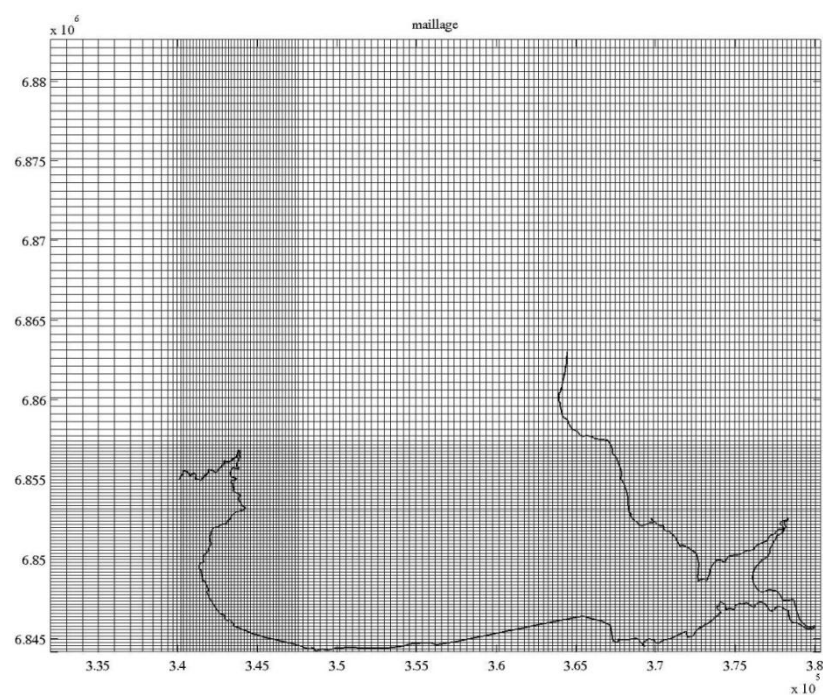


Figure V.2 : Maillage cartésien irrégulier utilisé sur la zone d'étude. Les mailles varient de 200 m à 500 m.

Les conditions aux limites (Nord et Ouest) sont fournies en hauteurs d'eau et sont calculées à partir de 115 harmoniques de marée (données SHOM).

Les débits moyens des trois fleuves sont prescrits : le Couesnon (au sud du Mont Saint-Michel), la Sée et la Sélune (à l'extrême est de la Baie). Ces débits, relativement faibles (respectivement 5.3, 9.1 et 11.2 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), agissent sur la dynamique orientale (formation de chenaux dans la Petite Baie) mais leur influence reste négligeable sur la circulation générale de la Baie.

Cayocca et al. (2006) ont montré l'importante sensibilité au vent des courants sur l'estran de la Baie du Mont Saint-Michel, notamment en morte eau (dans leur étude, le vent était considéré comme uniforme sur la Baie). Le forçage par le vent est donc pris en compte dans notre travail et provient de points de sortie du modèle Aladin (données fournies par Météo France) dans la Baie. Ce vent est ensuite interpolé sur l'ensemble de la Baie.

### V.1.3. Introduction de différentes rugosités et résultats

Nous introduisons donc différentes rugosités à l'intérieur de notre domaine de simulation en nous référant aux données issues de la campagne de mesure en baie du Mont Saint-Michel de 2009 (voir chapitre III partie 2).

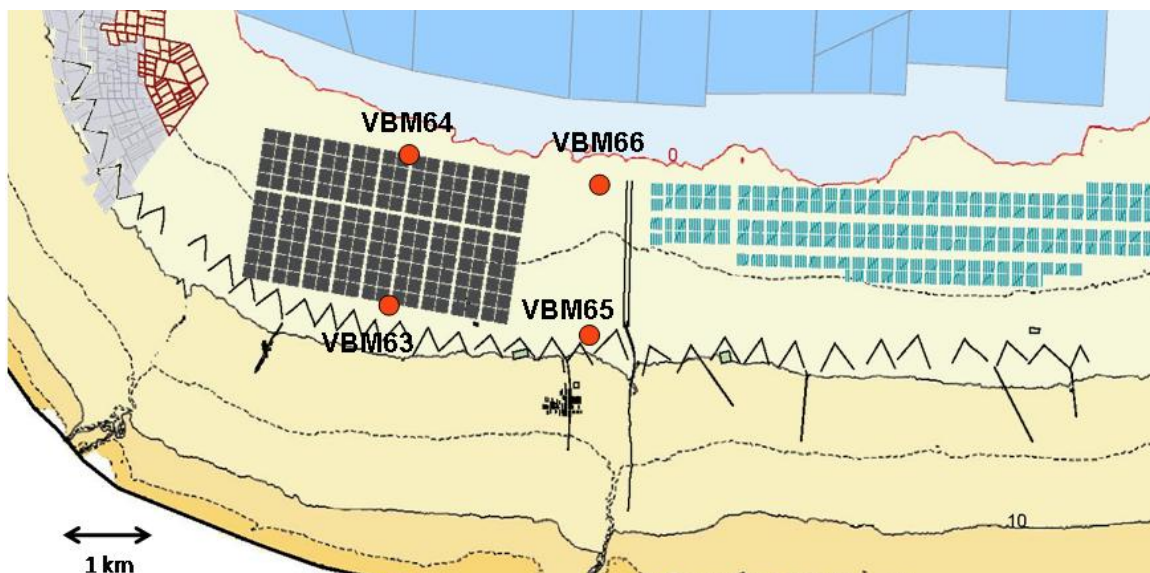


Figure V.3: Position des ADCP en baie du Mont Saint-Michel durant l'hiver 2009.



Quatre simulations (figure V.4) sont ainsi mises en œuvre afin de reproduire les intensités de vitesses mesurées par les ADCP (figure V.3) :

- Simulation n°1 : une rugosité uniforme fixée à 0.3 mm est utilisée sur tout le domaine
- Simulation n°2 : des rugosités différentes sont appliquées sur le domaine : une rugosité à l'extérieur et à l'entrée de la baie de 0.25 mm, une rugosité dans la baie de 0.1 mm et une rugosité dans la zone de Cancale (ouest de la baie) fixée à 10 mm. Cette dernière rugosité est volontairement exagérée afin de créer une circulation long-shore dans la baie et ainsi mieux représenter la composante est/ouest des vitesses.
- Simulation n°3 : le parc ostréicole est ajouté à la simulation n°2. Sa présence est prise en compte par une rugosité plus forte, fixée à 2 mm par des tests de sensibilité à la rugosité que nous avons effectués. Le fait d'introduire des plus fortes rugosités macroscopiques sur le fond dans les zones conchylicoles (parc ostréicole, parc mytilicole et zone de Cancale où des tables sont présentes) est justifié physiquement par le rôle d'obstacles que jouent les structures vis-à-vis de l'écoulement.
- Simulation n°4 : la zone mytilicole située à l'est de notre parc ostréicole est simulée par l'ajout d'une rugosité sur le fond fixée à 2 mm (identique à celle fixée pour le parc ostréicole). Cette simulation, visant à mieux reproduire les vitesses mesurées in-situ, ne sera pas retenue par la suite pour l'utilisation du modèle sédimentaire car nous voulons essentiellement déterminer l'impact du parc ostréicole sur la sédimentation, et non l'impact du parc mytilicole.

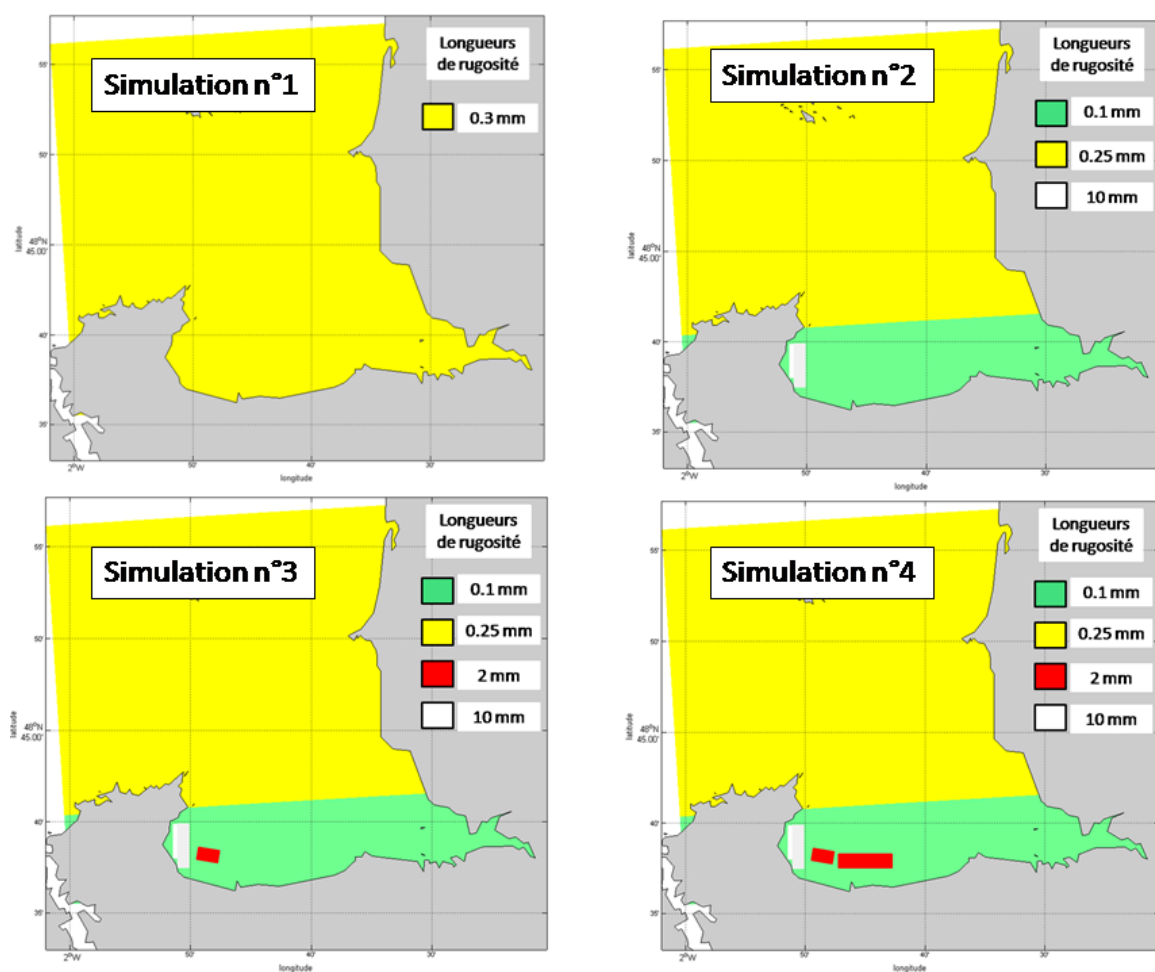


Figure V.4 : Rugosités sur le fond ( $z_0$ , en mm) fixées pour chaque simulation.

Les résultats de ces quatre simulations sont confrontés aux mesures de courant effectuées en chaque point (figure V.5). Pour plus de clarté et afin de faciliter les comparaisons, les résultats sont présentés sous forme de roses de courants.

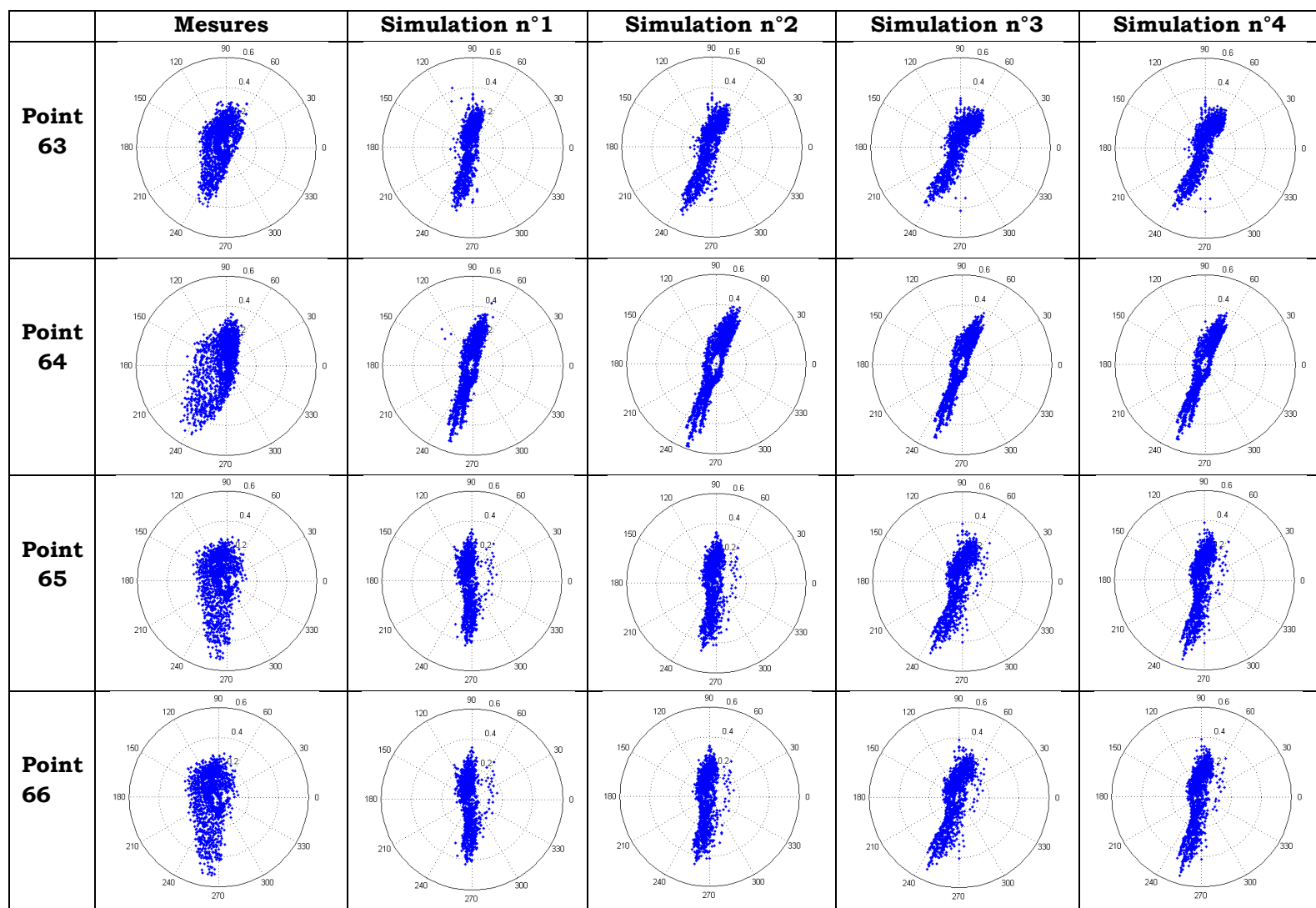


Figure V.5 : Roses des courants issues des mesures (1<sup>ère</sup> colonne) et des différentes simulations (colonnes 2, 3 et 4). La direction des courants est exprimée en degrés (90° représentant le nord) et leur intensité en  $m.s^{-1}$ .

En ce qui concerne la simulation n°1, les intensités de vitesses nord/sud sont bien représentées, hormis pour le point 65 (point de la radiale témoin situé en bas de l'estran) pour lequel l'intensité en flot est sous-estimée. Les intensités de vitesses est/ouest sont par contre mal représentées. Les mesures montrent en effet une tendance vers l'ouest durant le flot nettement supérieure à celle vers l'est observée durant le jusant. Le modèle ne reproduit pas cette tendance.

Il nous faut donc dans un premier temps appliquer une rugosité inhomogène sur le domaine afin de mieux représenter ces vitesses est/ouest (simulation n°2). Nous remarquons que grâce à cette différence de rugosité, les vitesses est/ouest sont mieux représentées aux points 63 et 64 (tendance oblique de l'ellipse, figure V.5), les deux points situés le plus à l'ouest. Les intensités de vitesses en ces points sont également mieux simulées. Les vitesses aux points 65 et 66 (points situés à l'est du parc ostréicole) sont quasiment inchangées.

Dans la simulation n°3, la présence du parc ostréicole est prise en compte. Avec cet ajout, les intensités de vitesses sont mieux simulées aux points 63, 64 et surtout 66. L'intensité de la vitesse durant le flot au point 65 est toujours sous-estimée.

Afin de mieux représenter les vitesses mesurées in-situ, notamment celles des points situés à l'est du parc, la présence de la zone mytilicole (bouchots) adjacente au parc est prise en compte (simulation n°4). Les résultats de cette dernière simulation montrent que les vitesses Est/Ouest sont un peu mieux représentées au point 63. Une légère surestimation des vitesses est observée au point 66. Au point 65, les vitesses sont mieux simulées bien qu'on sous-estime toujours légèrement l'intensité de la vitesse durant le flot.

Les résultats complets de cette simulation n°4 sont présentés sur les figures V.6, V.7, V.8 et V.9. Notons que les hauteurs d'eau en chaque point sont bien simulées par le modèle. Les vitesses nord/sud sont globalement bien représentées. Par contre, le modèle reproduit moins bien les vitesses est/ouest (dont l'intensité demeure plus faible), notamment pour les points situés en haut de l'estran.

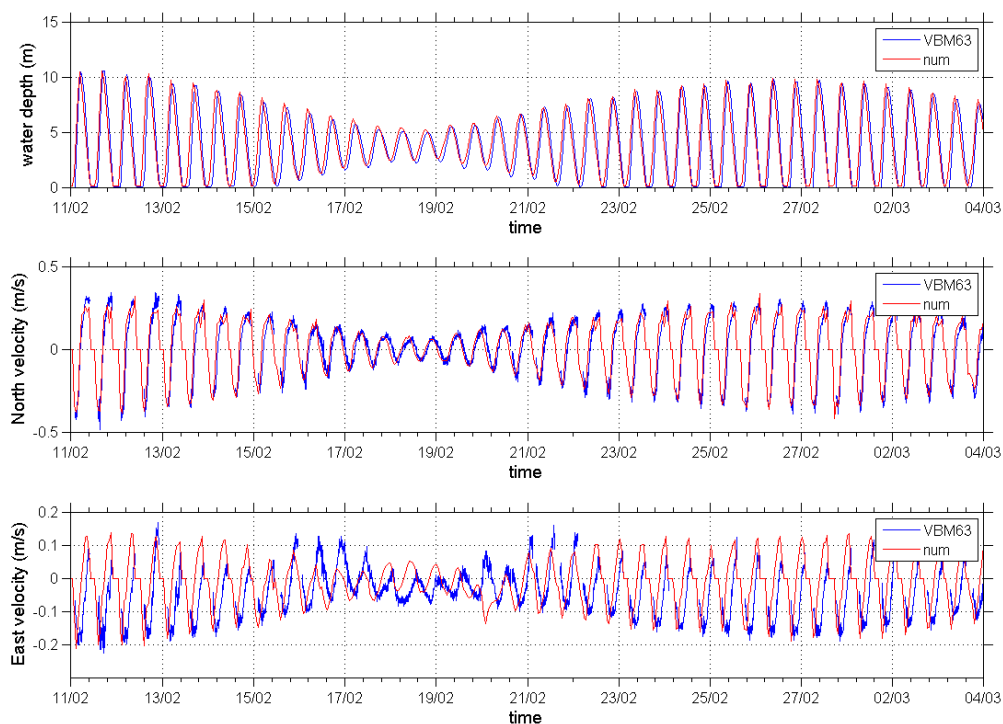


Figure V.6 : Hauteurs d'eau (en m), vitesses nord/sud (en  $m.s^{-1}$ ) et vitesses est/ouest (en  $m.s^{-1}$ ) au point VBM63 (point haut-estran de la radiale dans parc) : mesures ADCP (en bleu) et simulation 4 (en rouge)

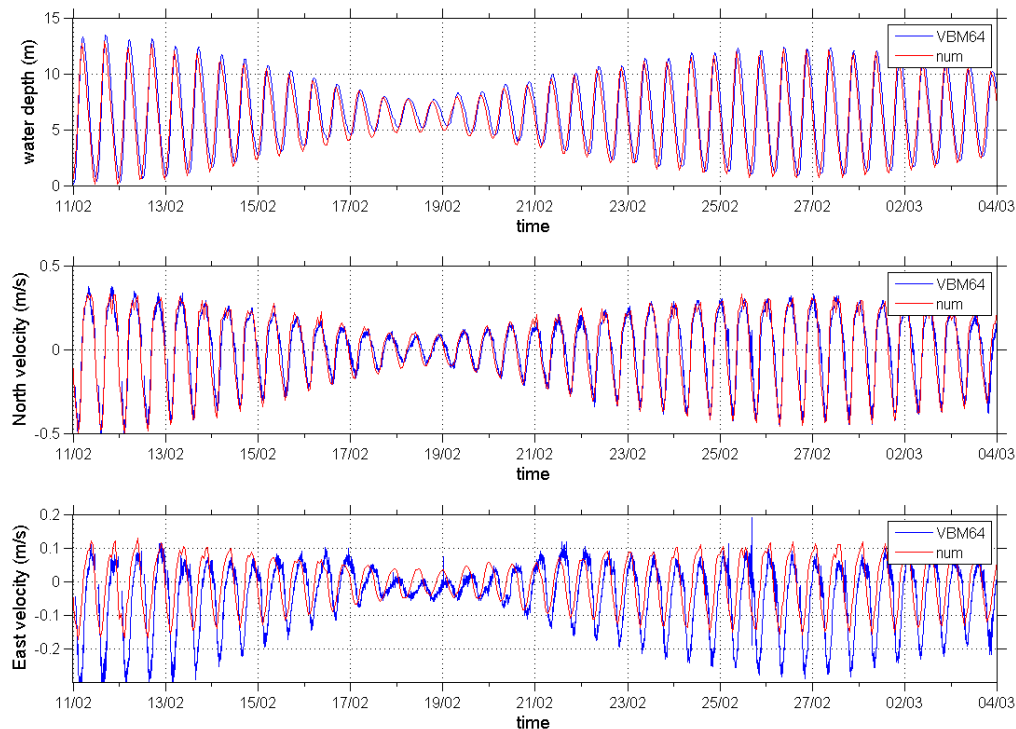


Figure V.7 : Hauteurs d'eau (en m), vitesses nord/sud (en  $m.s^{-1}$ ) et vitesses est/ouest (en  $m.s^{-1}$ ) au point VBM64 (point bas-estran de la radiale dans le parc) : mesures ADCP (en bleu) et simulation 4 (en rouge)

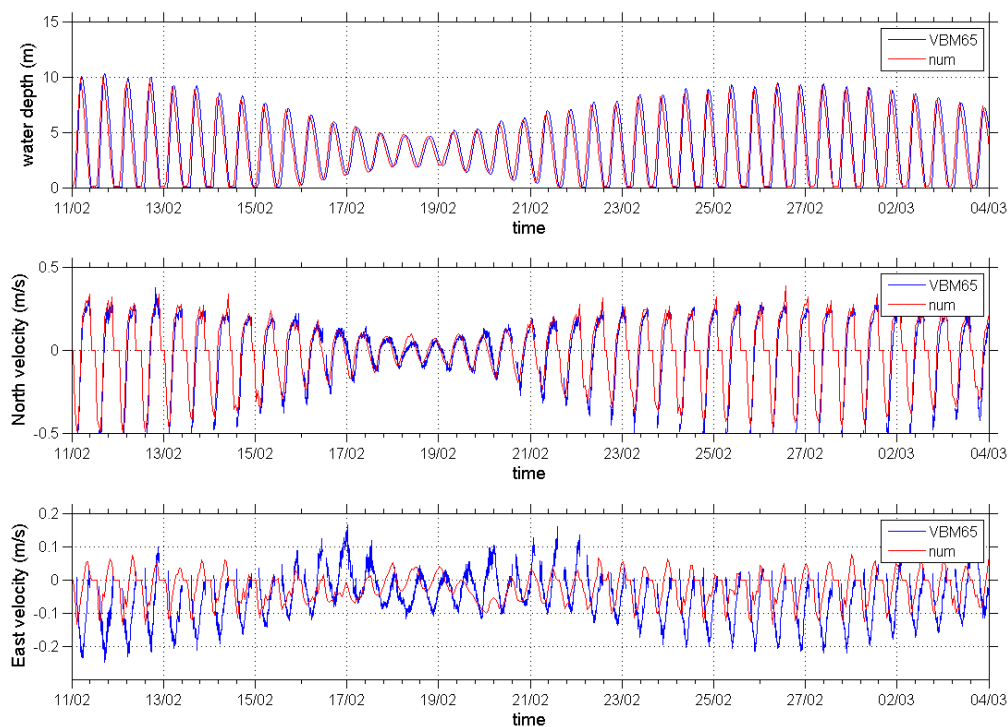


Figure V.8 : Hauteurs d'eau (en m), vitesses nord/sud (en  $m.s^{-1}$ ) et vitesses est/ouest (en  $m.s^{-1}$ ) au point VBM65 (point haut-estran de la radiale hors parc) : mesures ADCP (en bleu) et simulation 4 (en rouge)

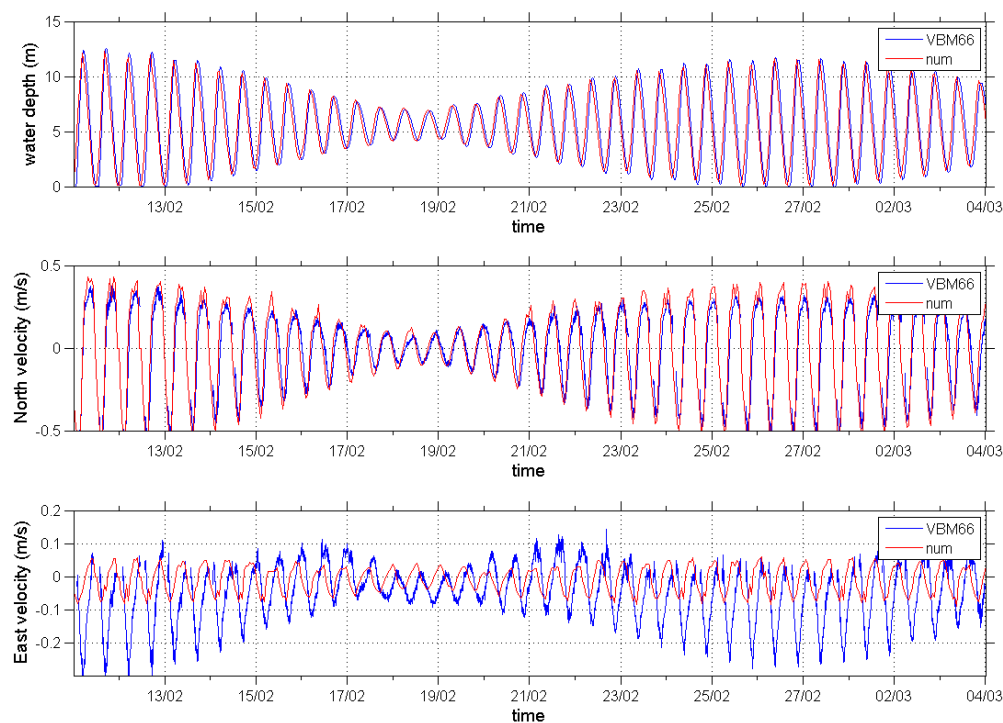
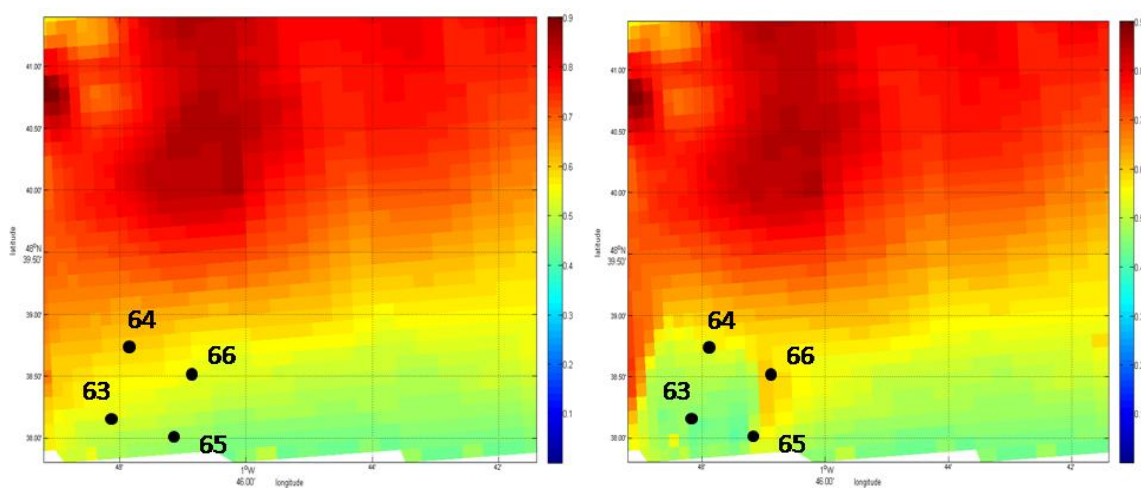


Figure V.9 : Hauteurs d'eau (en m), vitesses nord/sud (en  $m.s^{-1}$ ) et vitesses est/ouest (en  $m.s^{-1}$ ) au point VBM66 (point bas-estran de la radiale hors parc) : mesures ADCP (en bleu) et simulation 4 (en rouge).

Les résultats des simulations n°2 et n°3 sont utilisés pour représenter respectivement une configuration courantologique sans parc ostréicole et une configuration courantologique avec parc ostréicole, et seront incorporés dans le modèle sédimentaire (partie 3). Nous voyons que les principales différences entre ces deux simulations résident dans l'atténuation des courants pour les points situés dans les parcs (points 63 et 64), ainsi qu'à un effet de contournement qui se manifeste aux points 65 et 66 par des augmentations de la vitesse du courant (figure V.10). Ces différences d'intensités du courant entre les deux configurations se traduiront dans le modèle sédimentaire en termes de différences de contraintes sur le fond induite par le courant.

Il nous reste maintenant à calibrer le modèle de vagues (voir partie suivante), en discernant de la même façon une configuration sans parc et une configuration avec parc, afin d'incorporer également ses résultats dans le modèle sédimentaire.



*Figure V.10 : Vitesses maximales des courants en m.s-1 pour la simulation n°2 (à gauche) et la simulation n°3 (à droite), présentées sur la zone des parcs et positionnement des points de mesures ADCP (63 à 66).*



## V.2. Modèle de vagues

La modélisation des vagues en Baie du Mont Saint-Michel a été réalisée à l'aide du modèle SWAN, forcé à la limite ouverte par des spectres de houle extraits de simulations de WAVEWATCH III.

Les résultats de SWAN sont comparés aux données acquises par le biais du réseau de capteurs de pression (figure V.11) positionnés en Baie du Mont Saint-Michel durant l'hiver 2007 (cf chapitre II).

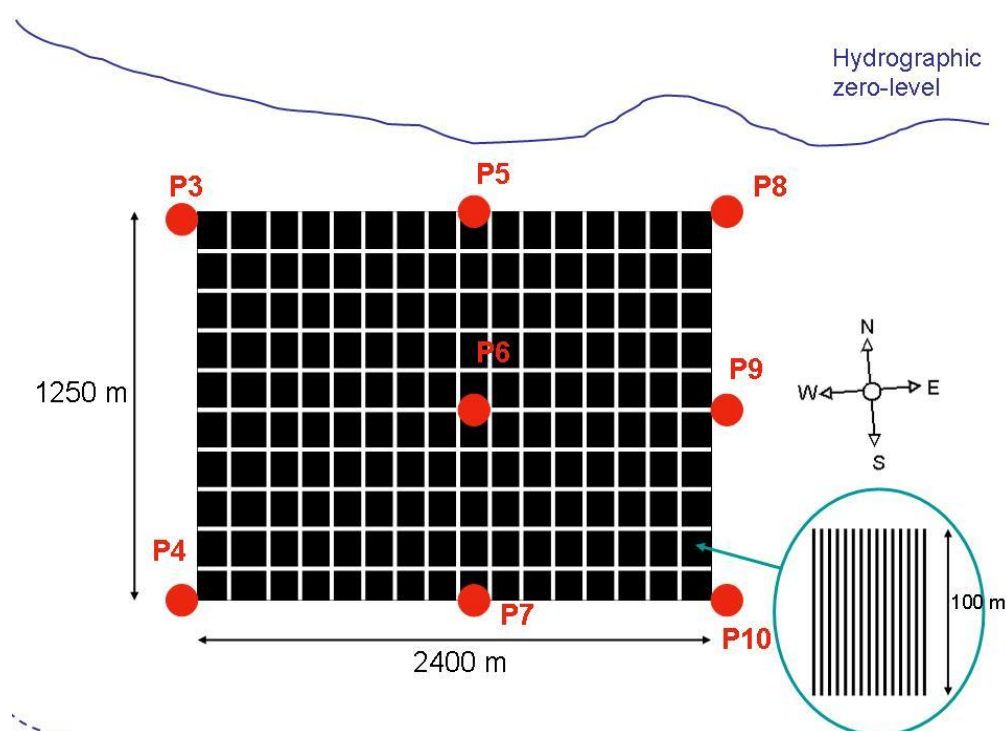


Figure V.11: Répartition des capteurs de pression à l'intérieur et autour du nouveau parc ostréicole en baie du Mont Saint-Michel.

WAVEWATCH III est un modèle de vagues de 3<sup>ème</sup> génération développé par NOAA/NCEP/NWS (Tolman, 2002a) dans l'esprit du modèle WAM (WAMDI Group, 1988; Komen, 1994). Il est issu du modèle WAVEWATCH I, développé à Delft University of Technology (Tolman, 1991), et du modèle WAVEWATCH II, développé à la NASA, au Goddard Space Flight Center (Tolman, 1992). Cependant, WAVEWATCH III diffère de ses prédécesseurs en plusieurs points importants tels que les équations du mouvement, la structure du modèle, les méthodes numériques et les paramétrages physiques. Les paramétrages des processus physiques inclus dans le modèle ne prennent pas en compte les conditions où les vagues sont fortement limitées par la profondeur, ce qui en fait un modèle essentiellement

applicable sur des échelles spatiales plus grandes que 1 km et en dehors des zones de déferlement. Ce modèle a été appliqué avec succès, à l'échelle globale et régionale, en différents endroits du monde (Tolman, 2002b; Chu et al., 2004; Tessier, 2006; Ardhuin, 2007; Dufois, 2008; Dufois et al., 2008).

SWAN (Simulating WAVes Nearshore) est aussi un modèle de vagues de 3<sup>ème</sup> génération, développé à Delft Hydraulics (Booij et al., 1999; Ris et al., 1999). Il permet de décrire la génération et la propagation des vagues en milieu côtier lorsque les phénomènes de diffraction et de réflexion sont faibles. Il est issu du modèle HISWA développé dans le même laboratoire (Holthuijsen et al., 1989). Le modèle, qui prend en compte le déferlement bathymétrique, a été testé par de nombreux auteurs (Ou et al., 2002; Cheung et al., 2003; Castelle et al., 2006; Tessier, 2006; Dufois, 2008; Dufois et al., 2008; Parisot et al., 2008).

Le modèle SWAN est forcé à la limite marine par des spectres 2D (fréquence et direction) issus du modèle WW3, configuré sur la Manche à 0.025° de résolution. Ce modèle est lui-même emboîté dans une configuration Golfe de Gascogne à 0.1° de résolution, une configuration Atlantique Nord à 0.5° et un modèle global à 1° de résolution. Au cours des simulations de WW3, 29 spectres sont extraits à la limite du domaine. SWAN interpole ensuite les spectres le long des frontières.

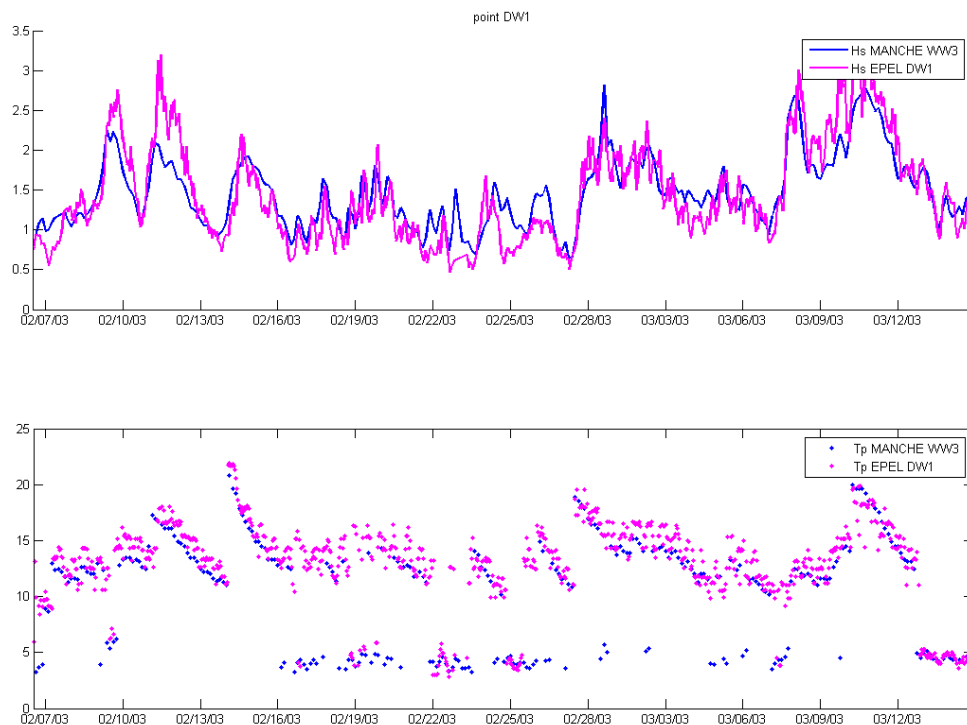


Figure V.12 : Hauteurs significatives de vagues (en m) et périodes de pic (en s) issues du modèle WW3 (en bleu) et de la mesure EPEL (en rose).

La validation de WW3 en termes de hauteurs significatives et de périodes de vagues est présentée en figure V.12. Les sorties du modèle, sans prise en compte de la refraction par les courants, sont comparées aux données d'une bouée de mesure houlographique EPEL (longitude : -2.4534 W, latitude : 48.894 N). Les vagues sont donc bien simulées par WW3.

Dans SWAN, l'évolution des spectres de vagues est décrite par l'équation de conservation de la densité d'action  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$ , où  $E$  est la densité spectrale d'énergie et  $\sigma$  la fréquence relative des vagues :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma}$$

Le premier terme est le terme local d'évolution de la densité d'action, les second et troisième termes sont les termes de propagation de la densité d'action dans les directions  $x$  et  $y$  (avec les vitesses de propagation correspondantes  $c_x$  et  $c_y$ ). Le quatrième terme représente le décalage en fréquence du spectre dû aux variations temporelles de courant et de hauteurs d'eau et le cinquième terme représente la refraction par les courants et la bathymétrie.

Le terme de droite est le terme source prenant en compte les processus physiques :

- de génération par le vent (échanges vagues-vent)
- de dissipation (moutonnement, déferlement et frottement sur le fond)
- d'interactions non linéaires (échanges vagues-vagues)

Soit :

$$S(\sigma, \theta) = S_{in}(\sigma, \theta) + S_{ds}(\sigma, \theta) + S_{nl}(\sigma, \theta)$$

Nous nous intéressons en particulier à deux termes :

- Le terme de génération par le vent :  $S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta)$

où  $A$  est un terme d'évolution linéaire, dont la formulation dérive de celle proposée par (Cavaleri and Malanotte-Rizzoli, 1981) et  $B$  est un terme d'évolution exponentielle qui peut s'exprimer dans SWAN selon (Komen et al., 1984) ou (Janssen, 1989; Janssen, 1991). Récemment, (van der Westhuysen et al., 2007) ont amélioré la dissipation par moutonnement avec une meilleure prise en compte de ce facteur limitant la croissance des vagues. La comparaison de ces trois modèles de génération de vagues par le vent avec les mesures de hauteurs significatives de vagues issus des capteurs de pression ALTUS (mesures en amont du parc à huîtres

vis-à-vis de la propagation des vagues et donc plus représentative d'une situation non-influencée par la présence des parcs) est présentée en figures V.13 et V.14. Au vu des résultats, le modèle de Westhuysen est retenu bien que l'on surestime les hauteurs significatives de vagues (C'est un défaut connu de SWAN de surestimer les vagues quand il y a présence simultanée de mer de vent et de houle de plus longue période (Ardhuin, communication personnelle)).

- Le terme de dissipation par frottement sur le fond (Weber, 1991a; Weber, 1991b):

$$S_{bot}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kH)} E(\sigma, \theta)$$

Avec  $C_{bottom}$  un coefficient représentant le frottement sur le fond.

Depuis les premiers travaux de (Putamn and Johnson, 1949), de nombreux modèles ont été proposés pour calculer ce coefficient de frottement. Dans SWAN, trois méthodes de calcul sont proposées :

- Le paramétrage empirique dit de JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) (Hasselmann et al., 1973), utilise un coefficient constant :  $C_{bottom} = 0.038 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$  pour (Hasselmann et al., 1973),  $C_{bottom} = 0.067 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$  pour (Bouws and Komen, 1983). Ce paramétrage est très utilisé en ingénierie côtière, mais sous-estime cependant la dissipation de la houle dans les zones de formation des rides (Ardhuin et al., 2001; Ardhuin, 2003a; Ardhuin, 2003b).

- Le paramétrage de Collins (Hasselmann and Collins, 1968; Collins, 1972) considère un coefficient de frottement proportionnel à la vitesse orbitale  $u_{rms}$  :

$$C_{bottom} = C_f g u_{rms}$$

$$\text{Avec } C_f = 0.015 \quad \text{et} \quad u_{rms}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sigma^2}{\sinh^2(kH)} E(\sigma, \vartheta) d\sigma d\vartheta$$

- Le paramétrage de Madsen (Madsen et al., 1990) intègre l'effet du coefficient de frottement dû à la houle  $f_w$  :

$$C_{bottom} = f_w \frac{g}{\sqrt{2}} u_{rms}$$

$f_w$  étant calculé par la formulation de (Jonsson, 1966) à partir d'une rugosité fixe indépendante des forçages exercés par la houle sur le fond. C'est cette formulation que nous utilisons avec une rugosité égale à 5 cm.

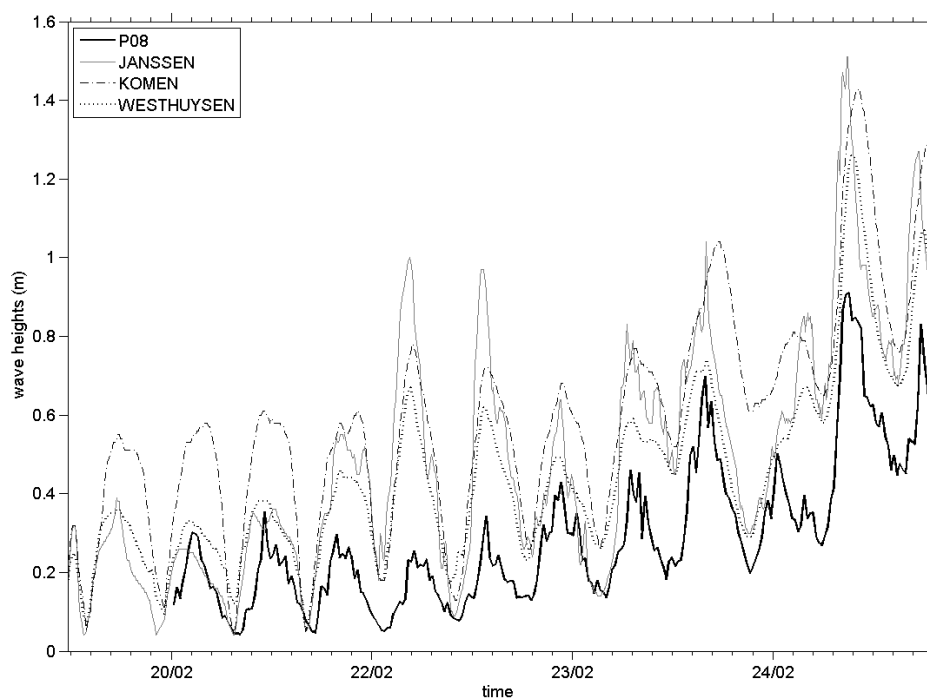


Figure V.13 : Hauteurs significatives de vagues au point bas-estran situé à l'est des parcs (capteur de pression P08) mesurées (en trait plein noir) et simulées par SWAN à l'aide du modèle de Janssen (en trait plein gris), du modèle de Komen (pointillés) et du modèle de Westhuysen (points).

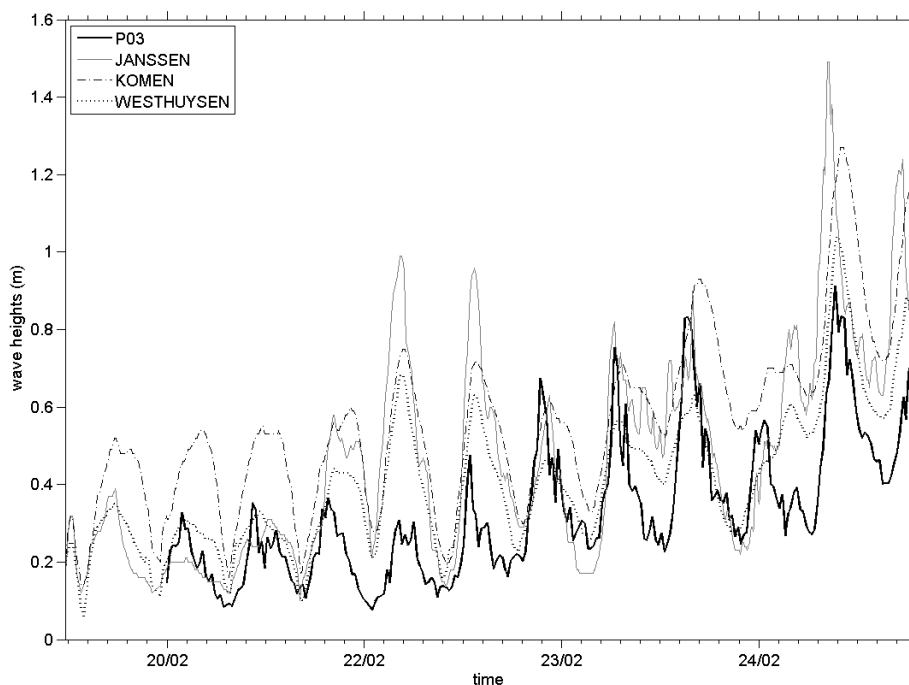


Figure V.14 : Hauteurs significatives de vagues au point bas-estran situé à l'ouest des parcs (capteur de pression P03) mesurées (en trait plein noir) et simulées par SWAN à l'aide du modèle de Janssen (en trait plein gris), du modèle de Komen (pointillés) et du modèle de Westhuysen (points).

Durant l'utilisation de SWAN ainsi forcé et paramétré avec les modèles de Westhuysen et Madsen pour la génération et la dissipation (pas de temps de simulation : 10 minutes), nous distinguons deux cas :

- Une configuration « sans parc ostréicole » où la rugosité du fond est homogène sur notre domaine d'étude
- Une configuration « avec parc ostréicole » où la rugosité du fond au niveau du parc est 10 fois plus grande que celle de notre domaine, soit une rugosité macroscopique de 50 cm.

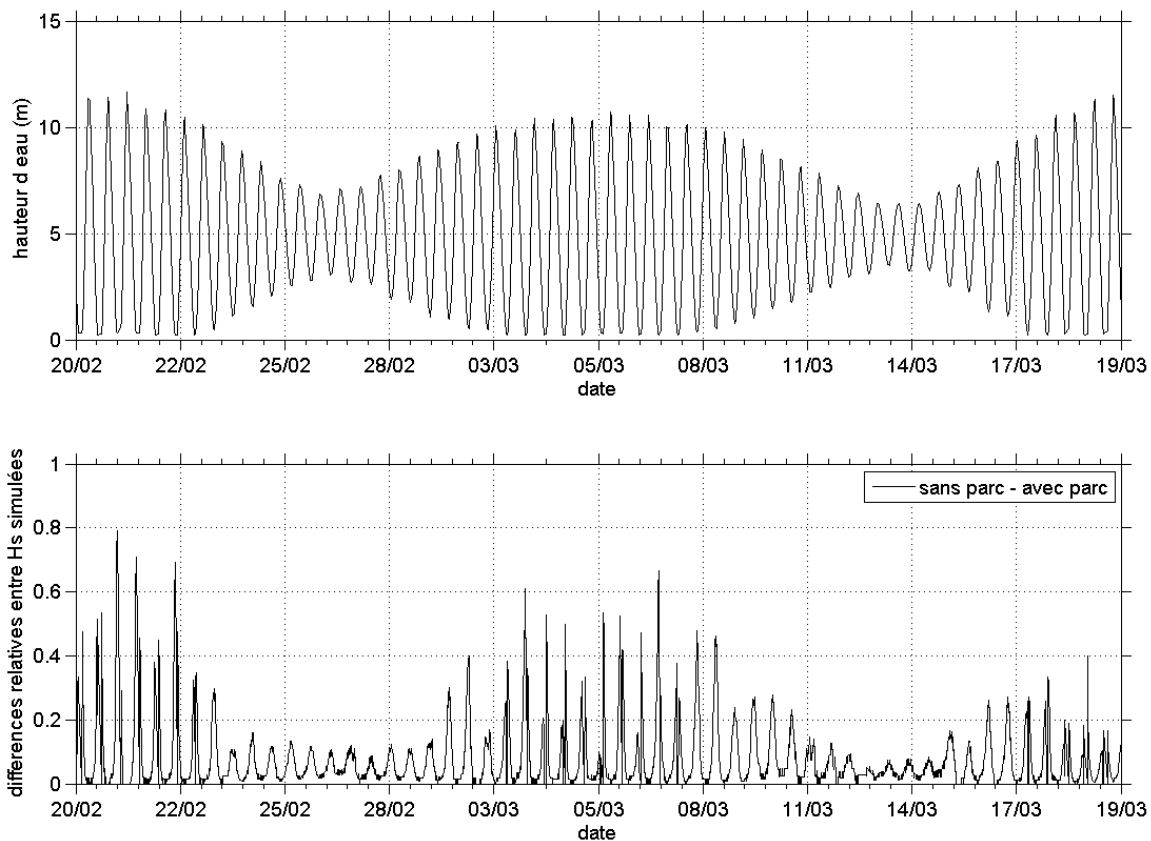
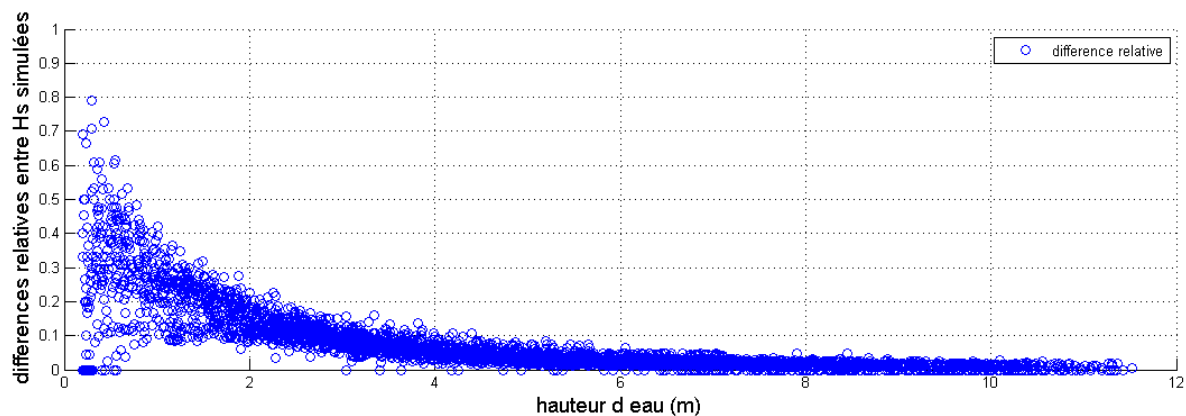


Figure V.15 : Hauteurs d'eau (en m) et différences relatives entre les hauteurs significatives de vagues simulées dans les configurations sans parc ostréicole et avec parc ostréicole (en m) en un point situé au centre du parc ostréicole.

Les résultats obtenus dans ces deux configurations sont comparés, en termes de hauteurs significatives de vagues (figure V.15). La présence du parc ostréicole, simulée par l'ajout d'une rugosité sur le fond, se traduit par une atténuation des vagues. Les différences relatives ( $\frac{H_{s \text{ sans parc}} - H_{s \text{ avec parc}}}{H_{s \text{ sans parc}}}$ ), allant de 0 à 0.8, semblent être plus significatives lors des forts coefficients de marée, par faibles hauteurs d'eau.

Nous traçons donc ces différences relatives de hauteurs significatives de vagues en fonction de la hauteur d'eau au point considéré (figure V.16). L'atténuation est en effet significative par faibles hauteurs d'eau et diminue très vite quand la hauteur d'eau augmente.



*Figure V.16 : Différences relatives de hauteurs significatives de vagues entre les configurations sans et avec parc ostréicole en fonction de la hauteur d'eau (en m), au milieu du parc ostréicole.*

Les résultats de la simulation avec la présence du parc ostréicole sont comparés aux mesures du capteur de pression situé en aval du parc ostréicole vis-à-vis de la propagation des vagues (capteur P07). Nous remarquons que nous surestimons toujours les hauteurs significatives de vagues bien que celles-ci soient mieux représentées par faibles hauteurs d'eau (figure V.17).



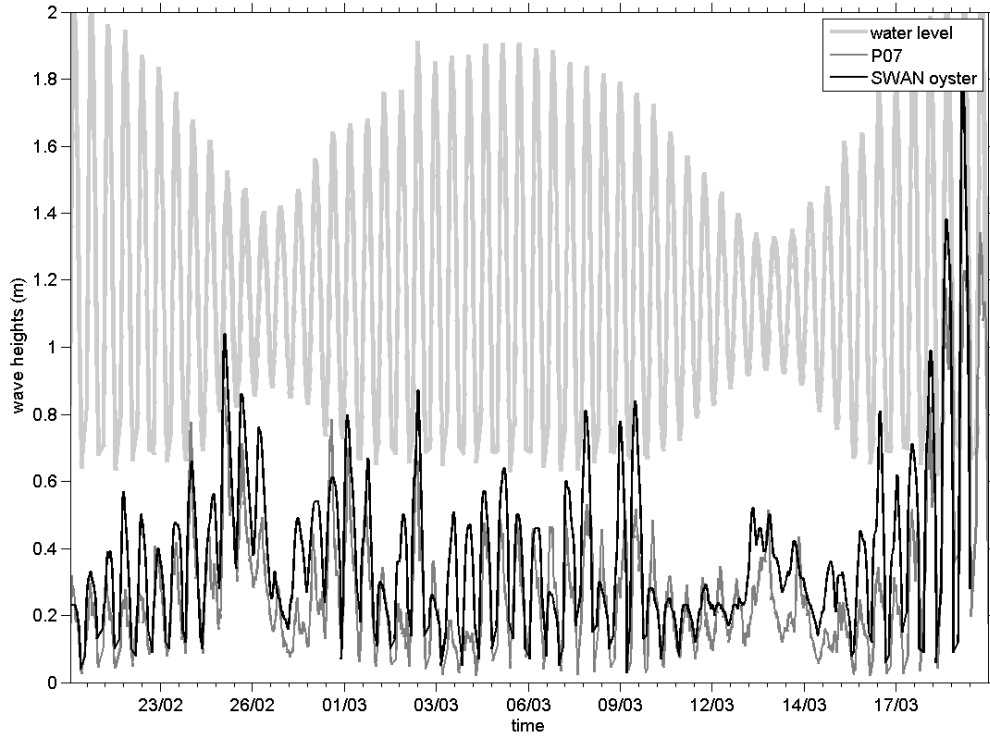


Figure V.17 : Hauteurs significatives de vagues au point haut-estran situé en aval du parc (capteur de pression P07) mesurées (en trait plein gris) et simulées par SWAN dans la configuration « avec parc » (trait plein noir). Les hauteurs d'eau mesurées sont présentées en arrière-plan.

De ces deux simulations (avec et sans parc ostréicole), les vitesses de frottement sur le fond induites par les vagues et les directions de ces vagues sont extraites toutes les 30 minutes pour l'ensemble de l'année 2007. Ces résultats sont incorporés dans le modèle hydro-sédimentaire SIAM-2DH.

Les vitesses d'excursion sur le fond  $u_b$  permettent de calculer la contrainte de cisaillement sur le fond due à l'action des vagues à partir de la relation (avec le facteur de frottement des vagues  $f_w$  pris constant, cf discussion dans la section suivante) :

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w u_b^2$$

Ensuite, à partir de cette contrainte sur le fond due aux vagues et de la direction des vagues, il est possible de calculer la contrainte de cisaillement totale exercée sur le fond (la contrainte sur le fond induite par le courant est calculée par le modèle courantologique), via la relation de (Soulsby, 1995) :

$$\tau_{WC} = \sqrt{(\tau_m + \tau_w * \cos(\varphi))^2 + (\tau_w * \sin(\varphi))^2}$$

avec le terme  $\tau_m$  prenant en compte le courant moyen et les interactions non-linéaires entre les vagues et le courant tel que:

$$\tau_m = \tau_c \left( 1 + 1.2 \left( \frac{\tau_w}{\tau_w + \tau_c} \right)^{3.2} \right)$$

et  $\phi$  est l'angle entre la direction des vagues et la direction du courant.

Cette contrainte totale sur le fond, donc exercée directement sur les sédiments, étant connue, nous pouvons utiliser le modèle sédimentaire (SIAM-2DH) afin d'observer l'impact à long terme (simulation d'une année) du parc ostréicole sur la dynamique sédimentaire de la baie.

### V.3. Modèle de transport sédimentaire

Dans nos simulations sédimentaires, nous nous intéressons uniquement à la dynamique des sédiments fins (vase). Les mélanges sable/vase ne sont donc pas considérés. Le processus de tassement n'est pas pris en compte : les sédiments se déposent et forment une ou plusieurs couches dont la concentration reste constante.

La répartition des sédiments superficiels de la Baie du Mont Saint-Michel est présentée en figure V.18. Nous voyons que les sédiments fins auxquels nous nous intéressons sont essentiellement localisés à l'intérieur de la baie. La partie extérieure (au nord de la ligne Pointe de Grouin-Granville) est donc exempte de sédiment lors de l'initialisation de notre modèle.

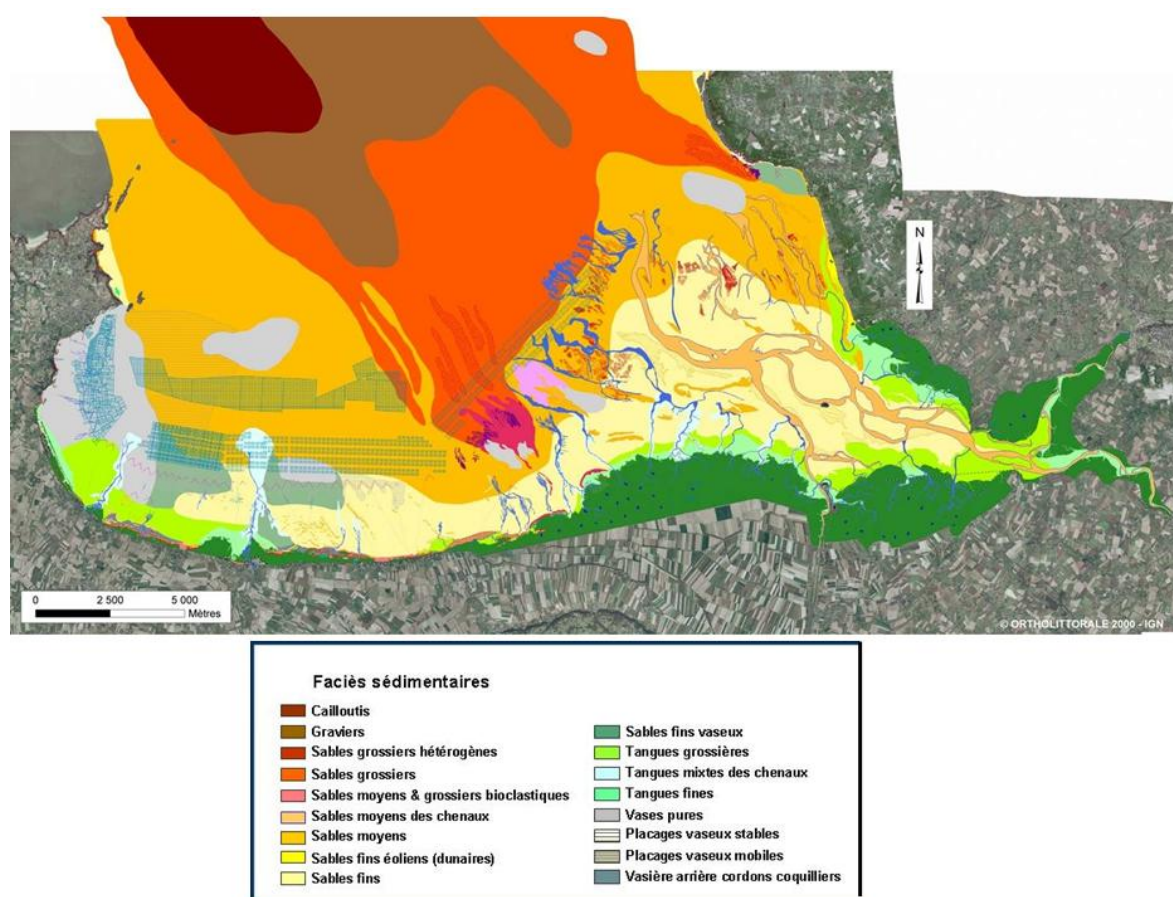


Figure V.18 : Répartition des différents types de sédiment de surface dans la Baie du Mont Saint-Michel (d'après Bonnot-Courtois)

L'érosion est considérée en utilisant la loi de Partheniadès (Partheniades, 1965). Cette loi exprime le flux d'érosion  $E$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) en fonction de l'excès de cisaillement adimensionnel :

$$E = E_0 \left( \frac{\tau - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \right) \quad \text{si } \tau \leq \tau_{cr}$$

$$E = 0 \quad \text{si } \tau \geq \tau_{cr}$$

Avec  $\tau$  ( $\text{N.m}^{-2}$ ) la contrainte totale sur le fond ( $\tau = \tau_{wc}$  dans notre cas),  $\tau_{cr}$  ( $\text{N.m}^{-2}$ ) la contrainte critique d'érosion (qui dépend de la concentration  $c_s$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) du sédiment de surface) et  $E_0$  le taux d'érosion ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ).

La contrainte critique d'érosion et le taux d'érosion sont calibrés à partir de la teneur en matières en suspension que nous avons mesurée sur la zone (figure V.19 et voir chapitre IV partie 1). Les résultats issus du modèle en termes de teneur en MES sont comparés aux mesures issus de l'ADV. Le choix de comparer ces résultats aux mesures ADV et non aux mesures de la sonde TROLL a été effectué car l'ADV semblait mieux traduire la dynamique liée aux épisodes de vagues (cf chapitre IV partie 1), et les vagues sont le forçage dominant de notre site d'étude.

Afin de tenir compte du fait que l'on surestime les vagues avec le modèle SWAN (cf section précédente), le facteur de frottement de la houle  $f_w$ , choisi comme étant constant, a été diminué lors de nos calculs de contraintes sur le fond induites par les vagues. Ce réajustement permet de rétablir l'équilibre en termes de matières en suspension entre la contribution liée aux vagues et celle liée aux courant de marée. La valeur choisie est de 0.02.

Afin de comparer les résultats issus de notre modèle bidimensionnel à nos mesures ponctuelles (à 5 cm du fond), un profil de courant logarithmique et une diffusivité turbulente parabolique sont supposés. On peut ainsi appliquer la formulation de Rouse (Rouse, 1936) afin d'obtenir la concentration de MES à l'altitude souhaitée (aide-mémoire Le Hir, <http://www.ifremer.fr/doc/2008/rapport-6273.pdf>).

Nous obtenons ainsi les paramètres suivants pour le modèle:

$$E_0 = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

$$\tau_{cr} = \alpha_1 c_s^{\alpha_2}$$

Avec  $\alpha_1 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$  et  $\alpha_2 = 2$ .

Cette relation donne une contrainte critique d'érosion de  $0.38 \text{ N.m}^{-2}$  pour une concentration de sédiment de surface de  $800 \text{ kg.m}^{-3}$  (concentration initiale du sédiment de surface) et de  $0.01 \text{ N.m}^{-2}$  pour les dépôts frais ( $150 \text{ kg.m}^{-3}$ ).

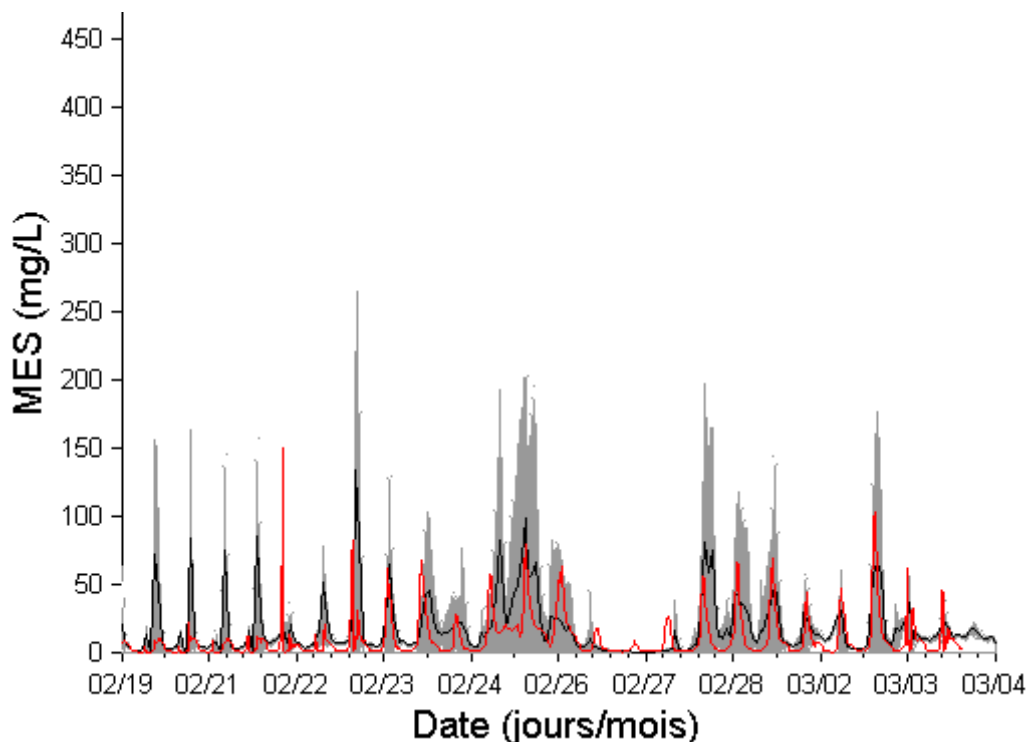


Figure V.19 : Teneur en MES mesurée par l'ADV situé dans une allée au centre des parcs (tracé noir), écart-type de la mesure ADV (enveloppe grise) et teneur en MES simulée par le modèle sédimentaire au même endroit (tracé rouge).

Le flux de dépôt  $D_{\text{flux}}$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) est exprimé selon la formulation de Krone (Krone, 1962) :

$$D_{\text{flux}} = w_s c_w \frac{\tau_{\text{crdep}} - \tau}{\tau_{\text{crdep}}} \quad \text{si } \tau \leq \tau_{\text{crdep}}$$

$$D_{\text{flux}} = 0 \quad \text{si } \tau \geq \tau_{\text{crdep}}$$

Dans notre étude, la vitesse de chute  $w_s$  (fonction de la concentration du sédiment) est comprise entre  $0.5 \text{ mm.s}^{-1}$  et  $1.5 \text{ mm.s}^{-1}$ .

$c_w$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) est la concentration de sédiment dans la colonne d'eau (teneur en MES) et  $\tau_{\text{crdep}}$  ( $\text{N.m}^{-2}$ ) est la contrainte critique de dépôt. Une valeur élevée ( $10 \text{ N.m}^{-2}$ ) de cette contrainte critique de dépôt est volontairement prescrite, ce qui permet une situation permanente de dépôt, au vue de la faible valeur de contrainte critique d'érosion pour les dépôts frais.

## V.4. Résultats

Afin de déterminer l'impact du parc ostréicole sur la dynamique sédimentaire à l'échelle de la baie, les simulations 2 et 3 (voir partie 1), respectivement sans et avec une rugosité sur le fond différente pour le parc, ainsi que les calculs de vagues correspondants issus de SWAN sont utilisés.

Les contraintes maximales sur le fond (induites par les vagues, les courants et leurs interactions) obtenues à partir de ces deux configurations sont présentées en figure V.20 et V.21. Ces contraintes maximales sont nettement plus faibles sur la zone concernée (zone de rugosité plus importante) dans la configuration avec parc ostréicole.

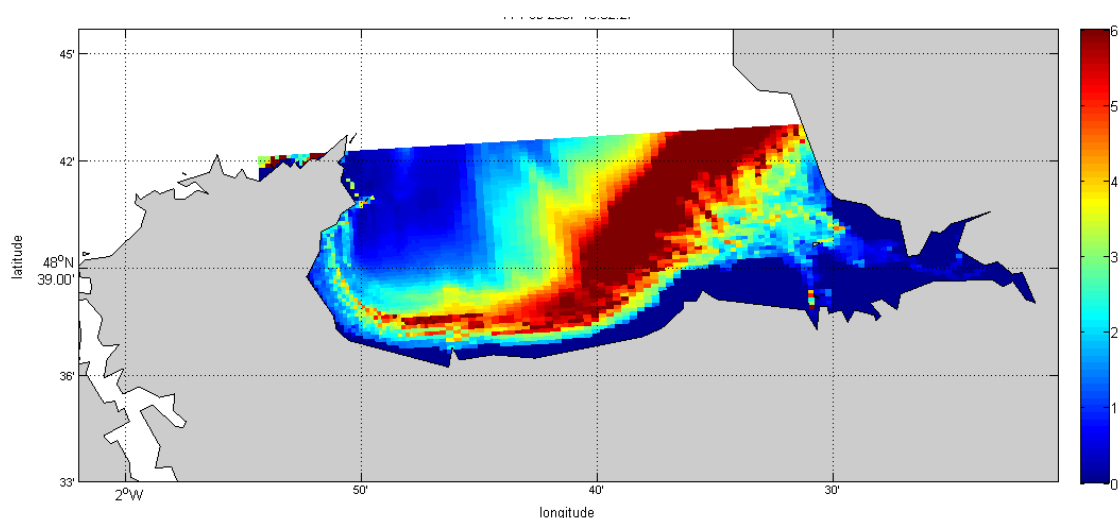


Figure V.20 : Contraintes maximales sur le fond (en  $N.m^{-2}$ ) dans la configuration sans parc ostréicole avec présence de vagues et de courants.

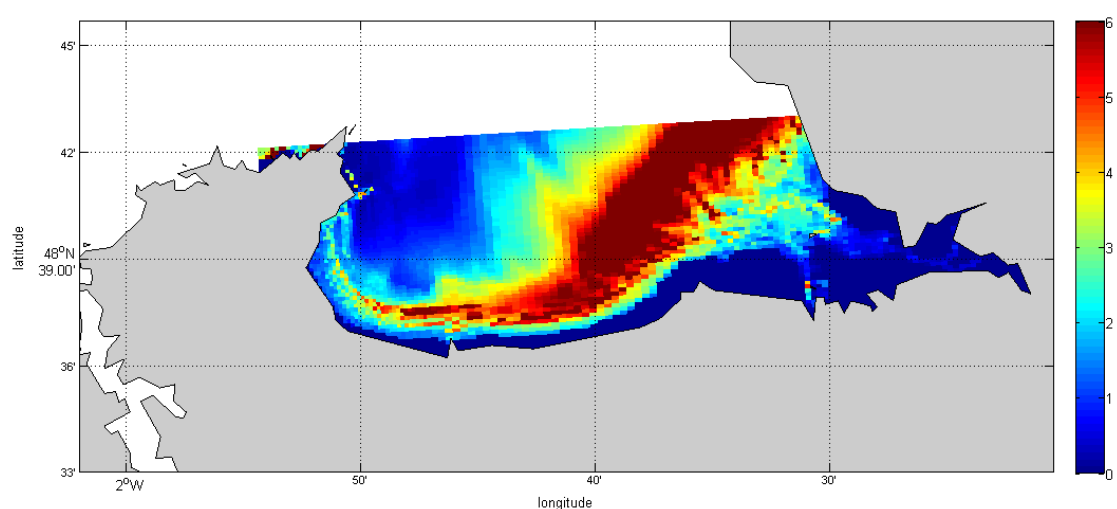
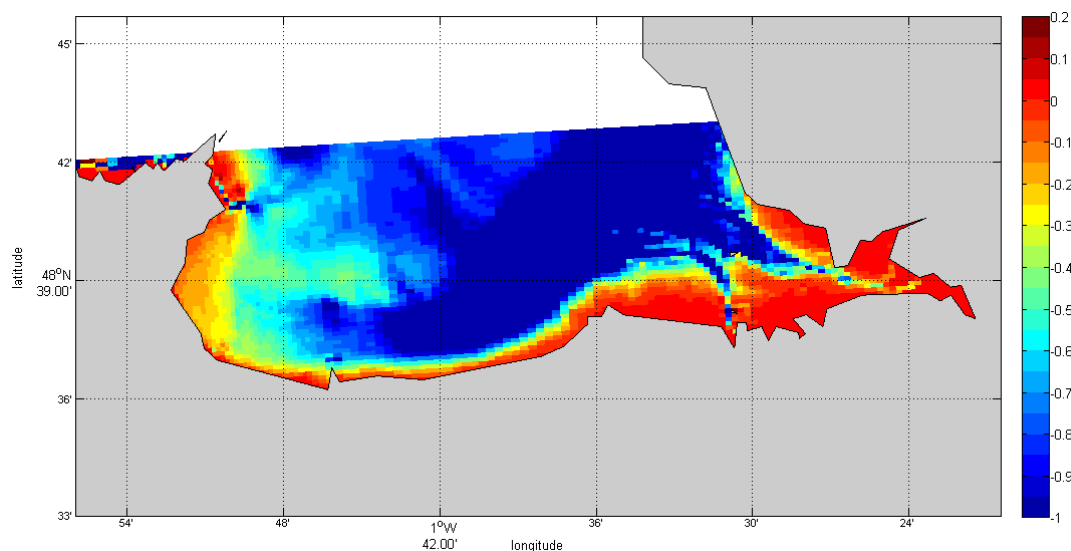
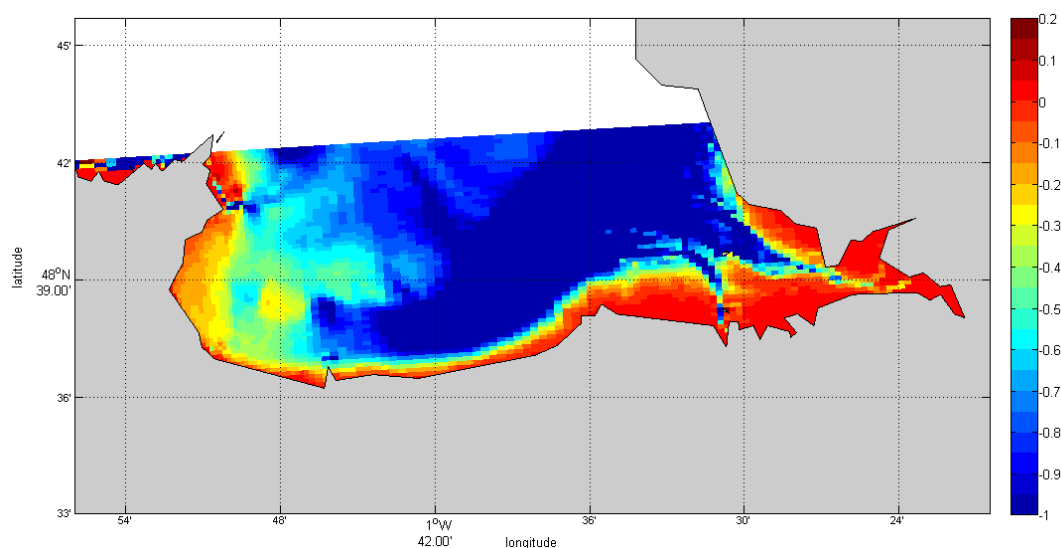


Figure V.21 : Contraintes maximales sur le fond (en  $N.m^{-2}$ ) dans la configuration avec parc ostréicole avec présence de vagues et de courants.

Les figures V.22 et V.23 présentent les résultats obtenus pour ces deux configurations après un an de calcul (année 2007) en termes d'épaisseur totale de sédiment sur le fond.



*Figure V.22 : Epaisseur totale de sédiment (en m) après un an (année 2007) de simulation sans la présence du parc à huîtres. Les zones de couleur rouge présentent une situation d'exhaussement du fond et les zones de couleurs orange à bleu une situation d'érosion (le niveau moyen initial présentait une valeur de 0 m).*



*Figure V.23 : Epaisseur totale de sédiment (en m) après un an (année 2007) de simulation avec la présence du parc à huîtres. Les zones de couleur rouge présentent une situation d'exhaussement du fond et les zones de couleurs orange à bleu une situation d'érosion (le niveau moyen initial présentait une valeur de 0 m).*



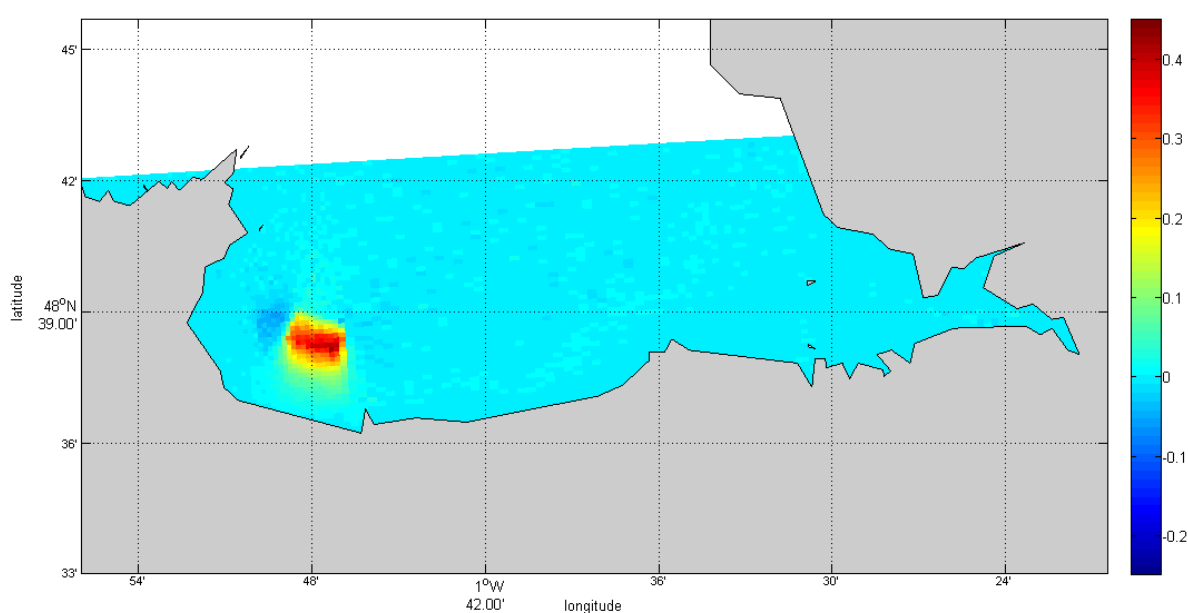
Le sédiment est érodé massivement de la partie Est et de la partie centrale de la baie et est transporté vers l'Ouest où des zones de dépôt sont identifiées, notamment à proximité de Cancale.

Des chenaux sont observés sur la partie Est de la baie. Dans cette partie, les courants de marées sont très forts et induisent donc des contraintes de cisaillement sur le fond importantes qui érodent le sédiment et ne permettent pas son dépôt.

Des zones de dépôt de sédiment sont également présentes sur tout le pourtour de la baie, en haut de l'estran, où les courants de marées sont plus faibles.

Le modèle représente donc bien cette grande variabilité de la couverture sédimentaire de la Baie du Mont Saint-Michel (Bahé, 2003), dans la direction Est-Ouest (très sableux à l'Est, vers le Mont Saint-Michel, jusque très vaseux à l'Ouest, dans le secteur de Cancale).

Certaines différences apparaissent entre ces deux simulations. Ces différences, représentatives de la présence du parc ostréicole, sont présentées sur la figure V.24.



*Figure V.24 : Différence d'épaisseur totale de sédiment (en m) entre la simulation avec parc ostréicole et la situation sans parc ostréicole. Les zones de couleurs turquoise à rouge présentent une situation d'exhaussement du fond et les zones de couleurs bleu-clair à bleu-foncé une situation d'érosion. Les contours du parc sont représentés en blanc.*

Une zone importante (environ 2 km de long selon la direction long-shore sur 3 km de long selon la direction cross-shore) de dépôt est observée dans et à proximité (à l'Est et au Sud) du parc. Cette zone se caractérise par une accumulation moyenne

de 20 à 30 cm de sédiment, avec des valeurs maximales d'exhaussement atteignant 35 cm.

Attention, ces résultats ne sont sans doute pas représentatifs de la réalité d'un point de vue quantitatif. En effet, le tassement n'est pas pris en compte par le modèle et il n'y a donc pas de compaction du sédiment, ce qui se traduit par des valeurs d'exhaussement trop élevées.

A proximité de cette zone (à l'ouest du parc), une zone d'érosion est présente avec en moyenne 5 à 6 cm de sédiments érodés.

L'impact du parc ostréicole sur la dynamique sédimentaire est donc représentatif essentiellement sur son emprise spatiale et dans son environnement très proche. L'effet de la présence des structures se traduit dans cette zone par une réduction des contraintes sur le fond qui entraîne à terme un exhaussement des fonds de plusieurs centimètres (notamment dans la partie sud du parc), qui vient confirmer nos mesures et observations sur le terrain.

De cette étude numérique à grande échelle, nous déduisons que le parc ostréicole ne participe donc que localement à l'envasement général de la baie.

## Ce qu'il faut retenir de cette modélisation numérique à l'échelle d'une baie

### ➤ Modèle courantologique :

Le modèle courantologique bidimensionnel SIAM-2DH (Brenon & Le Hir, 1999) est utilisé. Plusieurs simulations avec différentes rugosités sur le fond sont mises en œuvre et comparées aux mesures de courant acquises par ADCP. Deux simulations, respectivement sans et avec présence du parc ostréicole, sont retenues afin d'en extraire les contraintes sur le fond induites par les courants à incorporer dans le modèle sédimentaire.

### ➤ Modèle de vagues :

Le modèle de vagues SWAN (Booij et al., 1999 ; Ris et al., 1999) est utilisé. Les termes de génération par le vent et de dissipation par frottement sur le fond sont respectivement paramétrés par les modèles de Westhuysen et Madsen. Deux configurations, sans et avec présence du parc ostréicole (rugosité sur le fond multipliée par 10), sont retenues afin d'en extraire les contraintes sur le fond induites par les vagues à incorporer dans le modèle sédimentaire. Des comparaisons aux mesures de vagues acquises par capteurs de pression sont réalisées et montrent une surestimation du modèle par rapport à la mesure.

### ➤ Modèle sédimentaire :

Le modèle sédimentaire SIAM-2DH (Brenon & Le Hir, 1999) est utilisé. Les contraintes de cisaillement totales exercées sur le fond sont calculées à partir des contraintes issues des deux précédents modèles via la relation de Soulsby (Soulsby, 1995). Les paramètres d'érosion du modèle sont calibrés à partir de données de turbidité. Deux simulations, sans et avec parc ostréicole, sont comparées sur le long terme (simulation sur l'année 2007). Une zone de réduction des contraintes maximales, due à l'atténuation des courants et des vagues, est présente à l'échelle du parc. Cette zone se traduit par une zone d'accumulation de sédiment à l'intérieur et à proximité du parc.

### ➤ Commentaires sur cette modélisation :

Les résultats acquis à travers cette modélisation numérique viennent confirmer les observations que nous avons réalisé in-situ quant à l'envasement local du parc ostréicole. Néanmoins, elle ne constitue qu'une première étape vers la modélisation finale d'un parc. La manière « simple » (mais néanmoins quantifiée) de prendre en compte les installations par un artifice de rugosité sur le fond se doit d'être améliorée et sans doute traitée en trois dimensions avec une description plus fine des structures. Elle se doit aussi d'être validée sur d'autres sites d'études.





# Chapitre VI: Conclusions générales

De nombreux sites ostréicoles du littoral français font l'objet d'envasements locaux plus ou moins marqués. Ces envasements préoccupent les ostréiculteurs, de par la baisse de productivité ou la difficulté d'accès aux installations qu'ils engendrent, ainsi que les usagers de la baie et les collectivités territoriales.

Il était donc essentiel, à travers ce manuscrit, de tenter de comprendre l'origine de ces envasements et surtout d'estimer quelle est la part des installations ostréicoles elles-mêmes dans ces processus. Les installations surélevées (ou tables) de culture d'huîtres sont en effet situées dans des zones intertidales abritées qui sont généralement le siège de dépôts sédimentaires naturels importants.

Le but de ce travail de thèse était donc de comprendre et de quantifier finement les modifications de l'hydrodynamique locale inhérentes aux installations ostréicoles, avec pour finalité la détermination de leur impact sur la dynamique sédimentaire à plusieurs échelles spatiales.

La première chose à faire était d'évaluer l'impact des structures sur les forçages hydrodynamiques, vagues et courants, en champ proche.

Dans ce cadre, des modifications engendrées par la présence d'une ou plusieurs tables ont été observées, mesurées ou simulées :

- Un ralentissement des courants est observé sous les tables ostréicoles. Ce phénomène, dû à l'interaction entre la couche limite du fond et la couche limite de la partie inférieure de la table (au dessous des poches à huîtres), se traduit vis-à-vis du sédiment par la création d'une zone préférentielle de dépôt.
- Une déviation de la direction principale des courants est mise en évidence. Les courants ont tendance à se réorienter dans la direction de l'alignement des tables, comme cela avait été observé auparavant en zone de bouchots mytilicoles (Sornin, 1981).

Par contre, en ce qui concerne l'impact en champ proche d'une table sur les vagues, aucune modification significative n'est observée. Une table ostréicole « isolée » se révèle être un obstacle de dimension trop petite pour affecter la propagation des vagues.

Dans un second temps, l'impact d'un parc ostréicole dans son intégralité sur ces forçages hydrodynamiques a été évalué sur la base de mesures in-situ.

La multitude de structures surélevées engendre des modifications notables :

- Au niveau des courants, un ralentissement significatif est observé lors des forts coefficients de marée. Cette atténuation des vitesses peut atteindre 60



% en flot et 40 % en jusant. La signature des structures ostréicoles est alors visible sur toute la colonne d'eau.

- Au niveau de la propagation des vagues, deux cas sont distingués en fonction de l'importance de l'impact des structures :
  - Les hauteurs d'eau sont « grandes » par rapport à la hauteur des tables : dans ce cas, les vagues longues sont atténuées mais les vagues courtes sont peu affectées.
  - Les hauteurs d'eau sont voisines de la hauteur des tables : dans ce cas, tous les types de vagues sont atténués.

Une partie de ce manuscrit est ensuite dévolue au sédiment dont l'étude est à la fois la raison et la finalité de ce travail.

Les mesures in-situ réalisées afin d'estimer l'impact en champ proche des structures ostréicoles en termes de turbidité et d'altimétrie du sédiment sont difficiles à mettre en œuvre et des études complémentaires plus approfondies sont nécessaires afin de comprendre finement cet impact. Néanmoins, des différences à l'échelle locale, entre la zone directement sous une table et une zone adjacente (allée ou bout de table), sont observées :

- Une turbidité ambiante plus importante, dont l'origine est difficilement identifiable, est mesurée sous la table.
- Une évolution altimétrique du sédiment sous table moins perturbée est observée ; ce qui illustre un rôle de protection des tables vis-à-vis des forçages hydrodynamiques.

A cela s'ajoute la mise en évidence du rôle non négligeable de la biodéposition, déjà évoqué par (Sornin, 1981). Cet aspect, d'origine biologique, n'a volontairement pas été approfondi dans notre travail, faute de temps. De futures études devront l'aborder, notamment afin de quantifier l'importance de ces biodépôts dans les phénomènes d'envasement et de déterminer leur domaine spatial d'influence.

En ce qui concerne l'impact sédimentaire à l'échelle du parc, l'atténuation significative des vagues, précédemment évoquée, se traduit par une diminution sensible des contraintes de cisaillement sur le fond. Ainsi, dans la partie du haut-estran du parc ostréicole, située en aval vis-à-vis de la propagation des vagues, la contrainte de cisaillement critique susceptible d'éroder le sédiment en place est très rarement atteinte ; ce qui vient confirmer les observations de terrain quant à la granulométrie et la tendance à l'envasement de cette partie des implantations.

Dans la dernière partie de cette thèse, au vu de l'impact significatif des installations ostréicoles sur l'hydrodynamique à l'échelle du parc, nous avons entrepris la modélisation numérique d'une baie entière (la Baie du Mont Saint-Michel) afin

d'estimer l'impact sédimentaire des structures à long terme (simulation d'une durée de un an) et à grande échelle spatiale. Ce travail a été réalisé en première approche ; des techniques de changement d'échelle sont à mettre en œuvre pour prendre en compte plus finement les effets des structures évoqués précédemment et les retranscrire dans un modèle à l'échelle d'une baie.

Un modèle courantologique et un modèle de vagues ont ainsi été calibrés par le biais des mesures in-situ dont nous disposons. Dans ces deux modèles, la présence d'un parc ostréicole a été prise en compte par l'ajout d'une rugosité macroscopique sur le fond plus importante sur la zone concernée.

Les contraintes totales de cisaillement sur le fond issues de ces modèles ont ensuite été incorporées dans un modèle sédimentaire. Les résultats de ce modèle sédimentaire indiquent que les différences entre les simulations avec parc et sans parc semblent limitées à l'échelle spatiale du parc : une zone d'exhaussement du fond (et donc d'envasement dans notre cas) est observée dans le parc et à proximité immédiate du parc. L'impact de ce parc en termes de sédimentation est donc négligeable à l'échelle de la baie entière.

Les installations ostréicoles modifient donc la dynamique sédimentaire locale et jouent un rôle dans les processus d'envasement. Néanmoins leur impact semble rester limité à leur zone d'implantation et à ses abords et n'affecte pas un espace plus large tel une baie entière ou un bassin (sauf dans le cadre d'un taux d'occupation des surfaces au sol qui deviendrait très important). Le bilan de ce travail est d'avoir pu qualifier et quantifier finement l'impact de ces installations sur l'hydrodynamique et sur la dynamique sédimentaire en présence.

D'autres études, notamment une modélisation numérique 3D fine des installations, sont incontournables afin de proposer des solutions cohérentes d'aménagement aux professionnels du secteur. Il a été mis en évidence dans ce manuscrit l'importance de la direction d'alignement des tables vis-à-vis de la direction principale des courants de marées (comme l'évoquait (Sornin, 1981)). Il reste malgré tout le problème de la détermination de l'écartement entre les rangées de tables et de la hauteur minimale de ces tables. Par le biais de nos mesures, le fait d'imposer une hauteur minimale sous la table s'est avéré nécessaire afin de limiter les interactions avec le fond sédimentaire ; néanmoins, si cette hauteur augmente, les installations occuperont une place plus importante de la colonne d'eau et l'impact sur les courants et surtout sur les vagues en deviendra plus significatif. Des études complémentaires sont donc à mener pour optimiser les restructurations des concessions ostréicoles.

En ce qui concerne les perspectives de ce travail, il convient de distinguer encore une fois deux échelles spatiales différentes :

- A l'échelle locale, une étude expérimentale couplée à une modélisation numérique 3D de l'impact des tables sur les vagues, comme celle que nous avons réalisée pour le courant, pourrait être menée afin de déterminer la hauteur optimale des tables. Les interactions houle-courant devront ensuite être étudiées.

Une modélisation couplant dynamique sédimentaire fine de la colonne d'eau et aspects biologiques, avec présence d'une table ostréicole, serait nécessaire afin d'aborder les interactions entre les processus de biodéposition et de floculation/fragmentation liés à la turbulence engendrée par la table.

- Des techniques de changement d'échelle permettront de déterminer des coefficients d'atténuation des vagues et des courants (en fonction de la géométrie du parc, de la hauteur d'eau, de la vitesse du courant, ...) par les structures à l'échelle du parc.

Grâce à ces nouveaux apports, un modèle numérique adapté pourra être mis en œuvre afin d'étudier plusieurs scénarii (disposition des tables, hauteurs de tables,...) et de déterminer les paramètres optimaux permettant de limiter l'impact des structures sur la dynamique sédimentaire.

D'autre part, une étude complète, à l'instar de ce travail, devrait être effectuée afin de déterminer l'impact des installations mytilicoles sur l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire.



# Bibliographie

- Anctil, F. and Quach, T. T.** (1997). "Contrôle et analyse de mesures manométriques de vagues de surface." Revue canadienne de génie civil **24**(4). pp.:539-546.
- Ardhuin, F., Bertotti, L., Bidlot, J.-R., Cavaleri, L., Filipetto, V., Lefevre, J.-M., Wittmann, P.** (2007). "Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea." Ocean Engineering **34**(3-4). pp.:526-541.
- Ardhuin, F., Herbers, T. H. C. and O'Reilly, W. C.** (2001). "Eulerian-Lagrangian model for spectral wave evolution with application to bottom friction on the continental shelf." Journal of Physical Oceanography **31**(6). pp.:1498-1516.
- Ardhuin, F., Herbers, T.H.C., Jessen, P.F., O'Reilly, W.C.** (2003b). "Swell transformation across the Continental Shelf. Part II : Validation of a Spectral Energy Balance Equation." Journal of Physical Oceanography **33**. pp.:1940-1953.
- Ardhuin, F., O'Reilly, W.C., Herbers, T.H.C. et Jessen, P.F.** (2003a). "Swell transformation across the continental shelf. Part I : Attenuation and Directional Broadening." Journal of Physical Oceanography **33**. pp.:1921-1939.
- Bahé, S.** (2003). "Conchyliculture et dynamique morpho-sédimentaire en Baie du Mont Saint-Michel." Master. EPHE. pp. 161
- Barnes, H. A., Hutton, J. F. and Walters, K.** (1989). "An Introduction to Rheology", Elsevier.
- Bassoullet, P., Verney, R., Kervella, Y., Kervella, S., Jestin, H. and Voineson, G.** (2009). "Utilisation d'un altimètre (ALTUS) destiné à la quantification des dépôt/érosion en domaine littoral pour l'étude des corrélations avec les caractéristiques de vagues et les interfaces de dépôt." SHF 2009.
- Bertin, X., Chaumillon, E., Sottolichio, A. and Pedreros, R.** (2005). "Tidal inlet response to sediment infilling of the associated bay and possible implications

of human activities: the Marennes-Oléron Bay and the Maumusson Inlet, France." Continental Shelf Research **25**(9). pp.:1115-1131.

**Betteridge, K. F. E., Thorne, P. D. and Cooke, R. D.** (2008). "Calibrating multi-frequency acoustic backscatter systems for studying near-bed suspended sediment transport processes." Continental Shelf Research **28**(2). pp.:227-235.

**Birben, A. R., Özölçer, I. H., Karasu, S. and Kömürcü, M. I.** (2007). "Investigation of the effects of offshore breakwater parameters on sediment accumulation." Ocean Engineering **34**. pp.:284-302.

**Black, K. S. and Paterson, D. M.** (1997). "Measurement of the erosion potential of cohesive marine sediments : a review of current in situ technology." Journal of Marine Environmental Engineering **4**. pp.:43-83.

**Booij, N., Ris, R. C. and Holthuijsen, L. H.** (1999). "A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation." Journal of Geophysical Research **104**(C4). pp.:7649-7666.

**Bouchet, V. M. P., Debenay, J.-P., Sauriau, P.-G., Radford-Knoery, J. and Soletchnik, P.** (2007). "Effects of short-term environmental disturbances on living benthic foraminifera during the Pacific oyster summer mortality in the Marennes-Oléron Bay (France)." Marine Environmental Research **64**(3). pp.:358-383.

**Boulier, B., Hémon, A., Rivoalen, E. and Brossard, J.** (1997). "Etude expérimentale et numérique de l'écoulement au voisinage d'une plaque immergée dans la houle". 6èmes Journées hydrodynamique - Nantes.

**Bouma, T. J., van Duren, L. A., Temmerman, S., Claverie, T., Blanco-Garcia, A., Ysebaert, T. and Herman, P. M. J.** (2007). "Spatial flow and sedimentation patterns within patches of epibenthic structures: Combining field, flume and modelling experiments." Continental Shelf Research **27**(8). pp.:1020-1045.



**Bouws, E. and Komen, G. J.** (1983). "On the balance between growth and dissipation in an extreme, depth-limited wind-sea in the southern North Sea." Journal of Physical Oceanography **13**. pp.:1653-1658.

**Brenon, I. and Le Hir, P.** (1999). "Modelling the turbidity maximum in the Seine estuary (France) : Identification of formation processes." Estuarine, Coastal and Shelf Science **49**(4). pp.:525-544.

**Brevers, M.** (2008). "Expérimentation et modélisation de l'écoulement autour d'une table ostréicole." Master. Université d'Orléans. pp. 63

**Brossard, J.** (1986). "Contribution à l'étude de la turbulence à travers l'analyse d'un écoulement généré par la houle entre deux plaques." Ph.D. Université de Rouen. pp.

**Brossard, J., Perret, G., Blonce, L. and Diedhiou, A.** (2009). "Higher harmonics induced by a submerged horizontal plate and a submerged rectangular step in a wave flume." Coastal Engineering **56**(1). pp.:11-22.

**Burke, J. E.** (1964). "Scattering of surface waves on an Infinitely Deep Fluid." Journal of Mathematical Physics **5**(6). pp.:805-819.

**Burt, T. N. & Stevenson, J. R.** (1986) "Monitoring cohesive sediment transport in estuaries". Measuring Techniques of Hydraulics Phenomena in Offshore, Coastal and Inland Waters, BHRA, London, pp.: 325–336.

**Cann, P.** (2009). "Recherche d'une caractérisation de l'érodabilité des vases pures en fonction de leurs spécificités rhéologiques et de critères sédimentologiques." Master. Brest. pp. 50

**Carter, R. W.** (2005). "Wave energy converters and a submerged horizontal plate." Ph.D. University of Hawaii. pp. 251

**Castelle, B., Bonneton, P., Senechal, N., Dupuis, H., Butel, R. and Michel, D.** (2006). "Dynamics of wave-induced currents over an alongshore non-uniform

multiple-barred sandy beach on the Aquitanian Coast, France. ." Continental Shelf Research **26**(1). pp.:113-131.

**Cavaleri, L. and Malanotte-Rizzoli, P.** (1981). "Wind wave prediction in shallow water : Theory and applications." Journal of Geophysical Research **86**(C11). pp.:10961-10973.

**Cayocca, F., Dussauze, M., Le Hir, P., Bassoullet, P. and Jestin, H.** (2006). "Modélisation hydro-sédimentaire de la Baie du Mont Saint-Michel". IXèmes Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, Brest. pp :157-166.

**Cayocca, F., Bassoullet, P., Le Hir, P., Jestin, H. and Cann, P.** (2008). "Chapter 29 Sedimentary processes in a shellfish farming environment, Mont Saint Michel Bay, France". Proceedings in Marine Science, Elsevier. **Volume 9**: 431-446.

**Chen, K. H., Chen, J. T., Chou, C. R. and Yueh, C. Y.** (2002). "Dual boundary element analysis of oblique incident wave passing a thin submerged breakwater." Engineering Analysis with Boundary Elements **26**(10). pp.:917-928.

**Cheong, H. F., Jothi Shankar, N. and Nallayarasu, S.** (1995). "Analysis of submerged platform breakwater by eigenfunction expansion method." Ocean Engineering **23**(8). pp.:649-666.

**Cheung, K. F., Phadke, A. C., Wei, Y., Rojas, R., Douyere, Y. J. M., Martino, C. D., Houston, S. H., Liu, P. L. F., Lynett, P. J., Dodd, N., Liao, S. and Nakazaki, E.** (2003). "Modeling of storm induced coastal flooding for emergency management." Ocean Engineering **30**(11). pp.:1353-1386.

**Christie, M. C., Dyer, K. R. and Turner, P.** (1999). "Sediment flux and bed level measurements from a macro tidal mudflat." Estuarine, Coastal and Shelf Science **49**(5). pp.:667-688.

- Chu, P. C., Qi, Y., Chen, Y., Shi, P. and Mao, Q.** (2004). "South China sea wind-wave characteristics. Part I : validation of Wavewatch III using TOPEX/Poseidon data." J. Atmos. Ocean Technol. **21**. pp.:1718–1733.
- Collins, J. I.** (1972). "Prediction of shallow water spectra." Journal of Geophysical Research **77**(15). pp.:2693-2707.
- Darcy, H.** (1856). "Les fontaines publiques de la ville de Dijon".
- Dauer, L.** (1984). "Energietransport bei einer vertikalen Tauchwand und einer horizontalen Platte." Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität. pp.
- Davourie, J.** (2009). "Modélisation numérique des écoulements hydrodynamiques autour de tables ostréicoles." Master. pp. 42
- de Jonge, V. N.** (2000). "Importance of temporal and spatial scales in applying biological and physical process knowledge in coastal management, an example for the Ems estuary." Continental Shelf Research **20**(12-13). pp.:1655-1686.
- De Wit, P. J. and Kranenburg, C.** (1997). "The Wave-induced Liquefaction of Cohesive Sediment Beds." Estuarine, Coastal and Shelf Science **45**(2). pp.:261-271.
- Deloffre, J.** (2005). "La sédimentation fine sur les vasières intertidales en estuaires macrotidaux." Université de Rouen. pp.
- Deloffre, J., Lafite, R., Lesueur, P., Lesourd, S., Verney, R. and Guezennec, L.** (2005). "Sedimentary processes on an intertidal mudflat in the upper macrotidal Seine estuary, France." Estuarine, Coastal and Shelf Science **64**(4). pp.:710-720.

- Deloffre, J., Lafite, R., Lesueur, P., Verney, R., Lesourd, S., Cuvilliez, A. and Taylor, J. A.** (2006). "Controlling factors of rhythmic sedimentation processes on an intertidal estuarine mudflat - Role of the maximum turbidity zone in the macrotidal Seine estuary, France." Marine Geology **235**(1-4). pp.:151-164.
- Deloffre, J., Verney, R., Lafite, R., Lesueur, P., Lesourd, S. and Cundy, A. B.** (2007). "Sedimentation on intertidal mudflats at the mouth of macrotidal estuaries : rhythms and preservation." Marine Geology **241**. pp.:19-32.
- Dick, T. M.** (1968). "On solid and permeable submerged breakwaters." Civil Engineering Research Report.
- Dick, T. M. and Brebner, A.** (1968). "Solid and permeable submerged breakwaters." Proc. 11th Coastal Eng. Conference, London **2**. pp.:1141-1158.
- Drouin, A. and Ouellet, Y.** (1987). "Utilisation du phénomène du mur d'eau oscillant pour la protection des sites côtiers." Comptes Rendus Conférence Canadienne sur le Littoral. pp.:211-224.
- Dufois, F.** (2008). "Modélisation du transport particulaire dans le Golfe du Lion en vue d'une application au devenir des traceurs radioactifs issus du Rhône." PhD. Université du Sud Toulon Var. pp. 409
- Dufois, F., Garreau, P., Le Hir, P. and Forget, P.** (2008). "Wave- and current-induced bottom shear stress distribution in the Gulf of Lions." Continental Shelf Research **28**(15). pp.:1920-1934.
- Erriguible, A., Bernada, P., Couture, F. and Roques, M.** (2006). "Simulation of Convective Drying of a Porous Medium with Boundary Conditions Provided by CFD." Chemical Engineering Research and Design **84**(2). pp.:113-123.
- Feng, J.** (1993). "Laboratory experiments on cohesive soil-bed fluidization by water waves." University of Florida, Gainesville, U.S.A. pp.

**Fettweis, M., Sas, M. and Monbaliu, J.** (1998). "Seasonal, Neap-spring and Tidal Variation of Cohesive Sediment Concentration in the Scheldt Estuary, Belgium". Estuarine, Coastal and Shelf Science. **47**. pp.: 21-36.

**Findlay, R. H., Watling, L. and Mayer, L. M.** (1997). "Environmental impact of salmon net-pen culture on marine benthic communities in Maine. A case study." Estuaries **18**. pp.:145-179.

**Fluent** (2001). "Fluent 6 User's guide".

**Foda, M. A. and Tzang, S.-Y.** (1994). "Resonant fluidization of silty soil by water waves." Journal of Geophysical Research **99**(C10). pp.:20463-20475.

**Forchheimer, P.** (1901). "Wasserbewegung durch boden." Zeitschrift des Vereines, Deutscher Ingenieure **45**. pp.:1782-1788.

**Forrest, B. M. and Creese, R. G.** (2006). "Benthic impacts of intertidal oyster culture, with consideration of taxonomic sufficiency." Environmental Monitoring and Assessment **112**. pp.:159-176.

**Forrest, B. M., Elmetri, I., Clark, K.** (2007). "Review of the Ecological Effects of Intertidal Oyster Aquaculture." pp.:25.

**Forrest, B. M., Keeley, N. B., Hopkins, G. A., Webb, S. C. and Clement, D. M.** (2009). "Bivalve aquaculture in estuaries: Review and synthesis of oyster cultivation effects". Aquaculture, **298**, pp.: 1-15.

**Fugate, D. C. and Friedrichs, C. T.** (2002). "Determining concentration and fall velocity of estuarine particle populations using ADV, OBS and LISST." Continental Shelf Research **22**. pp.:1867-1886.

**Giles, H., Pilditch, C. A. and Bell, D. G.** (2006). "Sedimentation from mussel (*Perna canaliculus*) culture in the Firth of Thames, New Zealand: Impacts on sediment oxygen and nutrient fluxes." Aquaculture **261**(1). pp.:125-140.

- Gouleau, D., Jouanneau, J. M., Weber, O. and Sauriau, P. G.** (2000). "Short- and long-term sedimentation on Montportail-Brouage intertidal mudflat, Marennes-Oléron Bay (France)." Continental Shelf Research **20**. pp.:1513-1530.
- Goulletquer, P. and Le Moine, O.** (2002). "Shellfish farming and Coastal Zone Management (CZM) development in the Marennes-Oleron Bay and Charentais Sounds (Charente Maritime, France): A review of recent developments." Aquaculture International **10**(6). pp.:507-525.
- Graw, K. U.** (1993). "Shore protection and electricity by submerged plate wave energy converter." European Wave Energy Symposium, Edinburgh, UK.
- Green, T. R. and Heins, A. E.** (1953). "Water waves over a channel of Infinite Depth." Quart. of Applied Mathematics **11**(2). pp.:201-214.
- Guizien, K.** (1996). "Etude de l'hydrodynamique sous des plaques immergées proche du fond soumise à la houle." Master. Laboratoire des Ecoulements Geophysiques et Industriels. pp. 47.
- Ha, H. K., Hsu, W. Y., Maa, J. P. Y., Shao, Y. Y. and Holland, C. W.** (2009). "Using ADV backscatter strength for measuring suspended cohesive sediment concentration." Continental Shelf Research **29**(10). pp.:1310-1316.
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburd, A., Muller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, K. and Walden, H.** (1973). "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)." Deustch. Hydrogr. Z. Suppl. **12**(A8). pp.:1-95.
- Hasselmann, K. T. P. and Collins, J. I.** (1968). "Spectral dissipation of finite-depth gravity waves due to turbulent bottom friction." J. Mar. Res. **26**. pp.:1-12.

- Haven, D. S. and Morales-Alamo, R.** (1966). "Aspects of biodeposition by oyster and other invertebrate filter feeders." Limnol. Oceanog. **11**. pp.:487-498.
- Haven, D. S., Morales-Alamo, R.** (1968). "Occurrence and transport of faecal pellets in suspension in a tidal estuary." Sediment geology **2**(2). pp.:141-151.
- Hawkins, A. J. S., James, M. R., Hickman, R. W., Hatton, S. and Weatherhead, M.** (1999). "Modelling of suspension-feeding and growth in the green-lipped mussel *Perna canaliculus* exposed to natural and experimental variations of seston availability in the Marlborough Sounds, New Zealand." Mar. Ecol. Prog. Ser. **191**. pp.:217-232.
- Hay, A. E., Sheng, Y. P. and Jinyu** (1992). "Vertical profiles of suspended sand concentration and size from multi-frequency acoustic backscatter." Journal of Geophysical Research **97**. pp.:15,661-15,677.
- Heins, A. E.** (1948). "Water Waves over a channel of Finite Depth with a Dock." American Journal of Mathematics **70**. pp.:730-748.
- Heins, A. E.** (1950). "Water Waves over a channel of Finite depth with a submerged plane barrier." Canadian Journal of Mathematics **2**. pp.:210-222.
- Hendriks, I. E., van Duren, L. A. and Herman, P. M. J.** (2006). "Turbulence levels in a flume compared to the field: Implications for larval settlement studies." Journal of Sea Research **55**(1). pp.:15-29.
- Heral, M., Razet, D. and Prou, J.** (1989). "Acquiring continuous data on the particular matter of the estuarine bay of Marennes-Oleron during the spring planktonic bloom: Effect on the filtration rate of the oyster *Crassostrea gigas* ." Counc. Meet. of the Int. Counc. for the Exploration of the Sea, The Hague (Netherlands).
- Holthuijsen, L., Booij, N. and Herbers, T. H. C.** (1989). "A prediction model for stationnary, shortcrested waves in shallow water with ambient currents." Coastal Engineering **13**. pp.:23-54.

- Hosseini, S. A., Shamsai, A. and Ataie-Ashtiani, B.** (2006). "Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an Acoustic Doppler Velocimeter." Flow Measurement and Instrumentation **17**(1). pp.:59-68.
- Ifremer** (1981). "Golfe normand-breton - Bilan des connaissances - CNEXO - COB." pp.:171.
- Ijima, T., Ozaki, S., Eguchi, Y. and Kobayashi, A.** (1971). "Breakwater and Quay wall by Horizontal plates." Proceedings of Coastal Engineering Conference **3**. pp.:1537-1556.
- Janssen, P. A. E. M.** (1989). "Wave induced stress and the drag of air flow over sea waves." Journal of Physical Oceanography **19**. pp.:745-754.
- Janssen, P. A. E. M.** (1991). "Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting." Journal of Physical Oceanography **21**. pp.:1631-1642.
- Jestin, H., Bassoullet, P., Le Hir, P., L'Yavanc, J. and Degres, Y.** (1998). "Development of ALTUS, a high frequency acoustic submersible recording altimeter to accurately monitor bed elevation and quantify deposition or erosion of sediments." Proceedings of the Oceans' 98 IEEE/OES Conference **1/3**. pp.:189-194.
- Jonsson, I. G.** (1966). "Wave boundary layers and friction factors." Proc. 10th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE. pp.:127-148.
- Kakuno, S., Endoh, M., Zhong, Y., Shigematsu, T. and Oda, K.** (1998). "Development of a New Type of Reef Breakwater, Theoretical and Experimental Study." Proceedings 26th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE **2**. pp.:2166-2178.



- Kawanisi, K. and Yokosi, S.** (1997). "Characteristics of suspended sediment and turbulence in a tidal boundary layer." Continental Shelf Research **17**(8). pp.:859-875.
- Kervella, S.** (2010a). "Dynamique des sédiments fins et mixtes des zones intertidales de la baie de Marennes-Oléron - Caractérisation des sédiments, processus hydro-sédimentaires et modélisation appliquée." Ph.D. Université de La Rochelle. pp.
- Kervella, S., Kervella, Y., Verney, R., Le Hir, P., Robert, S. and Pantet, A.** (2010b). "Storm effects on stability of cohesive sediments in an oyster farming area." Ocean Dynamics **to be submitted**.
- Kervella, S., Robert, S., Pantet, A. and Jarny, S.** (2009). "Caractérisation des sédiments superficiels de la baie de Marennes-Oléron." European Journal of Environmental and Civil Engineering **13**(3). pp.:261-281.
- Kervella, Y., Cayocca, F., Verney, R., Jestin, H., Bassoullet, P., Cann, P., Le Hir, P. and Lesueur, P.** (2010c). "The impact of oyster structures on hydrodynamics in a macro-tidal environment." **submitted**.
- Kervella, Y., Germain, G., Gaurier, B., Facq, J. V., Cayocca, F. and Lesueur, P.** "Experimental study of the near-field impact of an oyster table on the flow." European Journal of Mechanics - B/Fluids **29**(1). pp.:32-42.
- Kervella, Y., Germain, G., Gaurier, B., Facq, J. V., Cayocca, F. and Lesueur, P.** (2009b). "Boundary layer development and shear stresses measurements around oyster tables." AMT'09. Conference on Advanced Model Measurement Technology for the EU Maritime Industry.
- Kim, S.-C., Friedrichs, C. T., Maa, J. P.-Y. and Wright, L. D.** (2000). "Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic doppler velocimeter data." Journal of Hydraulic Engineering **126**(6). pp.:399-406.

- Kirby, R., Bleakley, R. J., Weatherup, S. T. C., Raven, P. J. and Donaldson, N. D.** (1993). "Effect of episodic events on tidal mud flat stability, Ardmillian Bay, Strangford Lough, Northern Ireland." In: A.J. Mehta, Editor, Coastal and Estuarine Studies 42: Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport, American Geophysical Union, Washington, DC. pp.:378-392.
- Kojima, H., Yoshida, A. and Nakamura, T.** (1994). "Linear and Nonlinear Wave Forces Exerted on a Submerged Horizontal Plate." Proc. 24th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE **2**. pp.:1312-1326.
- Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P.,** (1994). "Dynamics and modelling of ocean waves. ." Cambridge University Press.
- Komen, G. J., Hasselman, S. and K., H.** (1984). "On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. ." Journal of Physical Oceanography **14**. pp.:1271-1285.
- Krone, R. B.** (1962). "Flume studies of the transport of sediment in estuarine shoaling processes." Technical report of Hydraulic Engineering Laboratory.
- Kusuki, Y.** (1978). "Fundamental studies on the deterioration of oyster growing grounds. 3. Sinking rates and distance of transport of the faeces of Japanese oyster." Bull. Jap. Soc. Sci. Fish **44**(9). pp.:971-973.
- Kusuki, Y.** (1981). "Fundamental studies on the deterioration of oyster growing grounds." Bull. Hiroshima Fish. Exper. Stn **11**. pp.:1-93.
- L.C.H.F.** (1977). "Mesures en nature de la dynamique sédimentaire aux abords du Mont Saint-Michel." pp.:118.
- Le Hir, P.** (2001). "Courants, vagues, marée : les mouvements de l'eau." Programme Scientifique Seine Aval.

- Le Hir, P., Cann, P., Jestin, H. and Bassoullet, P.** (2006). "Instrumentation légère pour la mesure de l'érodabilité des sédiments vaseux ou sablo-vaseux". IXèmes Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, Aber-Wrac'h.
- Le Hir, P., Cann, P., Waeles, B. and Bassoullet, P.** (2005). "Erodability of natural sediments : towards an erosion law for sand/mud mixtures from laboratory and field erosion tests". 8th International Conference on Cohesive Sediment transport, Saga, Japan.
- Le Hir, P., Cann, P., Waeles, B., Jestin, H. and Bassoullet, P.** (2008). "Chapter 11 Erodibility of natural sediments: experiments on sand/mud mixtures from laboratory and field erosion tests". Proceedings in Marine Science. H. Y. J. S. a. J. Z. G. Tetsuya Kusuda, Elsevier. **Volume 9**: 137-153.
- Le Hir, P., Kervella, S., Walker, P. and Brenon, I.** (2009). "Erosion and deposition patterns and associated sediment transport in the Marennes-Oléron bay (France)". 31<sup>èmes</sup> Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France - Morphodynamique et gestion des sédiments dans les estuaires, les baies et les deltas, Paris, France, 22-23 septembre 2009, SHF.
- Le Hir, P., Roberts, W., Cazaillet, O., Christie, M. C., Bassoullet, P. and Bacher, C.** (2000). "Characterization of intertidal flat hydrodynamics." Continental Shelf Research **20**. pp.:1433-1459.
- Leendertse, J. J. and Gritton, E. C.** (1971). "A water quality simulation, model for well-mixed estuaries and coastal seas", Rand Corporation, NYC.
- Lindenberg, J., Van Rijn, L. C. and Winterwerp, J. C.** (1989). "Some experiments on wave induced liquefaction of soft cohesive soil." Journal of Coastal Research. pp.:, Special Issue No. 5, High Concentration Cohesive Sediment Transport, edited by A.J. Mehta and E.J. Hayter: 127-137.
- Liu, P. L. F. and Iskandarani, M.** (1989). "Hydrodynamic Wave forces on submerged Horizontal plate." Proceedings of the 23rd Cong., IAHR. pp.:C51-C64.

- Lundquist, C. J. and Pilditch, C. A.** (2006). "Shellfish on the move: predicting recovery of coastal habits." Water & Atmosphere **14**(1). pp.:12-13.
- Lynch, J. F., Irish, J. D., Sherwood, C. R. and Agrawal, Y. C.** "Determining suspended sediment particle size information from acoustical and optical backscatter measurements." Continental Shelf Research **14**(10-11). pp.:1139-1165.
- Madsen, O. S., Mathisen, P. P. and Rosengaus, M. M.** (1990). "Moveable bed friction factors for spectral waves." Proceedings 22d Int. Conf. on Coastal Engineering. pp.:420-429.
- Martin, J. L., Sornin, J. M., Delmas, D., El Sayed, M. and Berthet, B.** (1989). "La biodéposition dans les aires conchylicoles. Son rôle dans la concentration de matière organique et de contaminants potentiels. Son impact sur le sédiment." pp.:60.
- Massard, E.** (2007). "Incertitudes des mesures bathymétrique : évaluation et application sur les levés bathymétriques de la Seudre et sur le banc ostréicole du bassin de Marennes-Oléron." Stage M2 professionnel.
- Matsunaga, N., Sugihara, Y., Komatsu, T. and Masuda, A.** (1999). "Quantitative properties of oscillating-grid turbulence in a homogeneous fluid." Fluid Dynamics Research **25**(3). pp.:147-165.
- Mc Iver, P. and Evans, D. V.** (1985). "The trapping of surface waves above a submerged horizontal cylinder." Journal of Fluid Mechanics **151**. pp.:243-255.
- Mehta, A. J.** (1988). "Laboratory studies on cohesive sediment deposition and erosion". Physical processes in estuaries. Dronkers and W. van Leussen, Springer-Verlag: 427-445.

- Mehta, A. J. and Lee, S. C.** (1994). "Problems in linking the threshold condition for the transport of cohesionless and cohesive sediment grain." Journal of coastal research **10**(1). pp.:170-177.
- Mehta, A. J. and Parchure, T. M.** (2000). "Surface erosion of fine-grained sediment revisited". Muddy coast dynamics and ressource management. B. W. Flemming, M. T. Delafontaine and G. Liebezeit. Amsterdam, Elsevier.
- Menter, F. R., Kuntz, M. and Langtry, R.** (2003). "Ten years of industrial experience with the sst turbulence model." Turbulence, Heat and Mass Transfer **4**. pp.:625-632.
- Migniot, C.** (1989). "Tassement et rhéologie des vases - Première Partie." La Houille Blanche **1**. pp.:11-29.
- Mitchell, L. M.** (2006). "In situ biodeposition rates of Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) on a marine farm in Southern Tasmania (Australia)." Aquaculture **257**. pp.:194-203.
- Mitchener, H. and Torfs, H.** (1996). "Erosion of mud/sand mixtures." Coastal Engineering **29**. pp.:1-25.
- Monaghan, J. J.** (1988). "An introduction to SPH." Computer Physics Communications **48**(1). pp.:89-96.
- Myrhaug, D., Slaattelid, O. H. and Lambrakos, K. F.** (1998). "Seabed shear stresses under random waves : prediction vs estimates from field measurements." Ocean Engineering **25**(10). pp.:907-916.
- Nepf, H. and Ghisalberti, M.** (2008). "Flow and transport in channels with submerged vegetation. ." Acta Geophysica **56**. pp.:753-777.
- Nikodic, J.** (1981). "Dynamique sédimentaire dans la partie occidentale de la baie du Mont Saint-Michel." Université de Nantes. pp. 173

**Nikuradse, J.** (1933). "Stromungsgesetze in rauhen Rohren". Heft.

**Ou, S.-H., Liau, J.-M., Hsu, T.-W. and Tzang, S.-Y.** (2002). "Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan." Ocean Engineering **29**(8). pp.:947-971.

**Parisot, J. P., Diet-Davancens, X., Sottolichio, A., Crosland, E., Drillon, C. and Verney, R.** (2008). "Modélisation des agitations dans le bassin d'Arcachon". Xèmes Journées Nationales de Génie Côtier-Génie Civil, Nice Sophia Antipolis.

**Parson, N. F. and Martin, P. A.** (1992). "Scattering of water waves by submerged plate using hypersingular integral equations." Applied Ocean Research **14**. pp.:313-321.

**Partheniades, E.** (1965). "Erosion and deposition of cohesive soils." Journal of the Hydrology division **91**(HY1). pp.:15-139.

**Patankar, S. V.** (1983). "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow." Hemisphere.

**Patarapanich, M.** (1978). "Wave Reflection from a Fixed Horizontal plate." Proceedings of the International Conference on Water Resources Engineering. pp.:427-446.

**Patarapanich, M.** (1984). "Maximum and zero reflection from submerged plate." Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering **110**(2). pp.:171-181.

**Patarapanich, M. and Cheong, H.-F.** (1989). "Reflection and transmission characteristics of regular and random waves from a submerged horizontal plate." Coastal Engineering **13**(2). pp.:161-182.

- Pichot, G.** (2007). "Modélisation et analyse numérique du couplage filet - écoulement hydrodynamique dans une poche de chalut." Ph.D. Université de Rennes. pp. 217
- Pichot, G., Germain, G. and Priour, D.** "On the experimental study of the flow around a fishing net." European Journal of Mechanics - B/Fluids **28**(1). pp.:103-116.
- Plew, D. R.** (2005). "The hydrodynamic effects of long-line mussel farms." Ph.D. University of Canterbury. pp. 330
- Porter, R.** (2002). "Surface Wave Scattering by Submerged Cylinders of Arbitrary Cross-Section." Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **458**(2019). pp.:581-606.
- Putamn, J. A. and Johnson, J. W.** (1949). "The dissipation of wave energy by bottom friction." Trans. Am. Geoph. Union **30**. pp.:67-74.
- Ravail-Legrand, B.** (1993). "Incidences du debit de la Charente sur la capacite biotique du bassin ostreicole de Marennes-Oleron." Ph.D. Université de Nantes. pp.
- Ris, R. C., Booij, N. and Holthuijsen, L. H.** (1999). "A third-generation wave model for coastal regions. 2. verification." Journal of Geophysical Research **104**(C4). pp.:7667-7681.
- Ritz, D., Lewis, M. E. and Shen, M.** (1989). "Response to organic enrichment of infaunal macrobenthic communities under salmonid seacages." Mar. Biol. **103**. pp.:211-214.
- Ropert, M.** (1999). "Caractérisation et déterminisme du développement d'une population de l'annélide tubicole *Lanice Conchilega* associé à la conchyliculture en Baie des Veys (Baie de Seine Occidentale)." Ph.D. Muséum National d'Histoire Naturelle. pp. 181

- Ropert, M., Mazurié, J., Bédier, E., Le Coz, F. et Soletchnik, P.** (2007). « Évaluation des risques dans les écosystèmes conchylicoles ». In: Samain, J.F., McCombie, H. (Eds.), *Mortalités estivales de l'huître creuse Crassostrea gigas*. Défi Morest. Ifremer/Quæ, pp. 1-49.
- Ross, M. A. and Mehta, A. J.** (1989). "On the mechanics of lutoclines and fluid mud." Journal of Coastal Research **5**. pp.:51-61.
- Schlichting** (1979). "Boundary-layer theory".
- SeaMER** (2000). "Etude d'impact de la restructuration conchylicole en Baie du Mont Saint-Michel, étude courantologique et sédimentologique." pp.:41.
- Sendil, U. and Graf, W. H.** (1974). "Transmission of regular waves past floating plates." Proceedings of 14th Conference on Coastal.
- Shutler, R., Ryder, D. & Johnson, C.** (1993) "Quality of laboratory calibrations". Calibration of Hydrographic Instrumentation. The Hydrographic Society, Special Publication. **31**. pp.: 7-12.
- Siew, P. F. and Hurley, D. G.** (1977). "Long Surface Waves Incident on a Submerged Horizontal Plate." Journal of Fluid Mechanics **83**. pp.:141-151.
- Silva Jacinto, R.** (2002). "Action des vagues sur les estrans et vasières. Application à l'estuaire de Seine." Université de Rouen. pp. 231p
- Silva Jacinto R., B., Ch., Levoy, F., Védieu, C.H., Lesourd, S., Rousset, H., Benoît, L., Jestin, H., Monfort, O.** (1998). "Réponse de la vasière Nord aux forçages météo-océaniques." pp.:99-111.
- Simpson, J. H., Williams, E., Brasseur, L. H. and Brubaker, J. M.** (2005). "The impact of tidal straining on the cycle of turbulence in a partially stratified estuary." Continental Shelf Research **25**(1). pp.:51-64.



- SOGREAH** (1986). "Amélioration de la mytiliculture dans la Baie de l'Aiguillon."
- Sornin, J.-M.** (1979). "Enquête sur la sédimentation et l'exhaussement des fonds dans les zones conchylicoles des côtes de France." Master. Nantes. pp.
- Sornin, J.-M.** (1981). "Processus sédimentaires et biodéposition liés à différents modes de conchyliculture." Institut des Sciences de la Nature de l'Université de Nantes. pp. 188
- Sornin, J.-M.** (1983). "Influence de la biodéposition sur les propriétés rhéologiques des vases." J. Rech. Océanogr. **8**. pp.:115-123.
- Sornin, J.-M.** (1984). "Rôle et conséquence de la biodéposition à l'interface eau/sédiment." J. Rech. Océanogr. **9**. pp.:38-40.
- Soulsby, R. L.** (1983). "The bottom boundary layer of shelf seas". Physical oceanography of coastal and shelf seas. B. Johns. Amsterdam, Elsevier: 189-266.
- Soulsby, R. L.** (1995). "Bed shear stress due to combined waves and currents". Advances in coastal morphodynamics. M. J. F. Stive, H. J. de Vriend, J. Fredsoet al, Delft Hydraulics: 4:20-4:23.
- Soulsby, R. L.** (1997). "Dynamics of marine sands. A manual for practical applications". London, Thomas Telford.
- Soulsby, R. L. and Humphery, J. D.** (1990). "Field observations of wave-current interaction at the sea bed". Water wave kinematics. A. Torum and O. T. Gudmestad, Kluwer Academic Publishers: 413-428.
- Stoker, J. J.** (1957). "Water waves." Pure and Applied Mathematics **4**.

- Struski, C.** (2005). "Modélisation des flux de matières dans la baie de Marennes-Oléron : Couplage de l'hydrodynamisme, de la production primaire et de la consommation par les huîtres." Université de la Rochelle. pp. 317
- Suhayda, J. N.** (1984). "Interactions between surface waves and muddy bottom sediments. Lecture notes on Coastal and estuarine Studies." Estuarine Cohesive Sediment Dynamics **14**. pp.:401-428.
- Sylvand, B.** (1995). "La Baie des Veys, 1972-1992: structure et évolution à long terme d'un écosystème benthique intertidal de substrat meuble sous influence estuarienne." Doctorat d'Etat. Université de Caen. pp. 409
- Sylvand, B., Marion, C., Lecouturier, A. and Ropert, M.** (2003). "Nouvelle cartographie sédimentaire de la zone conchylicole de Grandcamp-Maisy en baie des Veys." IFREMER Ressources Aquacoles. pp.:13.
- Takano, K.** (1960). "Effets d'un obstacle parallélépipédique sur la propagation de la houle." La Houille Blanche **15**. pp.:247-267.
- Talke, S. A. and Stacey, M. T.** (2003). "The influence of oceanic swell on flows over an estuarine intertidal mudflat in San Francisco Bay." Estuarine, Coastal and Shelf Science **58**. pp.:541-554.
- Tessier, C.** (2006). "Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière: exemple de la région marine Bretagne Sud." Université de Bordeaux 1 - IFREMER. pp. 428
- Tessier, C., Le Hir, P., Lurton, X. and Castaing, P.** (2008). "Estimation de la matière en suspension à partir de l'intensité rétrodiffusée des courantomètres acoustiques à effet Doppler (ADCP)." Comptes Rendus Geosciences **340**(1). pp.:57-67.
- Tesson, M.** (1973). "Aspects dynamiques de la sédimentation dans la baie de Marennes-Oléron (France)." Université Bordeaux 1. pp.

- Thevenot, M. M. and Kraus, N. C.** (1993). "Comparison of acoustical and optical measurements of suspended material in the Chesapeake Estuary." J. Marine Env. Eng. **1**. pp.:65-79.
- Thorne, P. D. and Hanes, D. M.** (2002). "A review of acoustic measurements of small-scale sediment processes." Continental Shelf Research **22**. pp.:603-632.
- Thorne, P. D., Vincent, C. E., Hardcastle, P. J., Rehman, S. and Pearson, N.** (1991). "Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices." Marine Geology **98**(1). pp.:7-16.
- Timsit, O., Sylvand, B. and Lefeuvre, J.-C.** (2003). "Evolution du macrozoobenthos intertidal de la baie des Veys de 1985 à 2000." C. R. Acad. Sci. Paris pp.:14.
- Tolhurst, T. J., Riethmuller, R. and Paterson, D. M.** (2000). "In situ versus laboratory analysis of sediment stability from intertidal mudflats." Continental Shelf Research **20**. pp.:1317-1334.
- Tolman, H. L.** (1991). "A third generation model for wind on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depth and currents." Journal of Physical Oceanography **21**. pp.:766-781.
- Tolman, H. L.** (1992). "Effects of numerics on the physics in a third-generation wind-wave model." Journal of Physical Oceanography **22**. pp.:1095-1111.
- Tolman, H. L.** (2002a). "User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. Rapport technique 222, NOAA/NWS/NCEP/MMAB."
- Tolman, H. L.** (2002b). "Validation of WAVEWATCH-III version 1.15. Rapport technique 213, NOAA/NWS/NCEP/MMAB."

- Trembanis, A. C., Wright, L. D., Friedrichs, C. T., Green, M. O. and Hume, T.** (2004). "The effects of spatially complex inner shelf roughness on boundary layer turbulence and current and wave friction: Tairua embayment, New Zealand." Continental Shelf Research **24**(13-14). pp.:1549-1571.
- Tubman, M. W. and Suhayda, J. N.** (1976). "Wave action and bottom movements in fine sediments". 15th Conf. Coastal Engineering, Honolulu.
- van der Westhuysen, A. J., Zijlema, M. and Battjes, J. A.** (2007). "Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water." Coastal Engineering **54**(2). pp.:151-170.
- van Ledden, L., van Kestern, W. G. M. and Winterwerp, J. C.** (2004). "A conceptual framework for the erosion behaviour of sand-mud mixtures." Continental Shelf Research **24**. pp.:1-11.
- Van Rijn, L. C.** (1993). "Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas". Amsterdam, The Netherlands.
- Verney, R.** (2006). "Processus de contrôle de la dynamique des sédiments cohésifs." Université de Rouen. pp. 325
- Verney, R., Brun Cottan, J. C., Lafite, R., Deloffre, J. and Taylor, J. A.** (2006). "Tidally-induced shear stress variability above intertidal mudflats. Case of the macrotidal Seine estuary." Estuaries and Coasts **29**(4). pp.:653-664.
- Verney, R., Deloffre, J., Brun-Cottan, J. C. and Lafite, R.** (2007). "The effect of wave-induced turbulence on intertidal mudflats: Impact of boat traffic and wind." Continental Shelf Research **27**(5). pp.:594-612.
- Verney, R., Deloffre, J., Brun Cottan, J. C. and Lafite, R.** (2007). "The effect of wave-induced turbulence on intertidal mudflats : Impact of boat traffic and wind. Application to the macrotidal Seine estuary (France)." Continental Shelf Research **27**(5). pp.:594-612.

- Vincent, C. E. and Downing, A.** (1994). "Variability of suspended sand concentrations, transport and eddy diffusivity under non-breaking waves on the shoreface." Continental Shelf Research **14**(2-3). pp.:223-250.
- Voulgaris, G. and Meyers, S. T.** (2004). "Temporal variability of hydrodynamics, sediment concentration and sediment settling velocity in a tidal creek." Continental Shelf Research **24**(15). pp.:1659-1683.
- Waeles, B.** (2005). "Modélisation morphodynamique de l'estuaire de Seine." University of Caen -- IFREMER. pp. 230
- WAMDI Group** (1988). "The WAM Model - A third generation ocean wave prediction model." Journal of Physical Oceanography **18**. pp.:1775-1810.
- Wang, K.-H. and Shen, Q.** (1999). "Wave motion over a group of submerged horizontal plates." International Journal of Engineering Science **37**(6). pp.:703-715.
- Ward, L. G., Kemp, W. M. and Boynton, W. R.** (1984). "The influence of waves and seagrass communities on suspended particulates in an estuarine embayment." Marine Geology **59**(1-4). pp.:85-103.
- Weber, S. L.** (1991a). "Eddy-viscosity and drag-law models for random ocean wave dissipation." Journal of Fluid Mechanics **232**. pp.:73-98.
- Weber, S. L.** (1991b). "Bottom friction for wind sea and swell in extreme depth-limited situations." Journal of Physical Oceanography **21**. pp.:149-172.
- Weston, D. P.** (1990). "Quantitative examination of macrobenthic community changes along an organic enrichment gradient." Mar. Ecol. Prog. **61**. pp.:233-244.

- Whitehouse, R. J. S., Bassoullet, P., Dyer, K. R., Mitchener, H. J. and Roberts, W.** (2000). "The influence of bedforms on flow and sediment transport over intertidal mudflats." Continental Shelf Research **20**(10-11). pp.:1099-1124.
- Whitehouse, R. J. S. and Mitchener, H. J.** (1998). "Observations of the morphodynamic behaviour of an intertidal mudflat at different timescales." In: Black, K.S., Paterson, D.M., Cramp, A. (eds) Sedimentary Processes in the Intertidal Zone. Geological Society, London, Special Publication **139**. pp.:255-271.
- Wiberg, P. L. and Sherwood, C. R.** (2008). "Calculating wave-generated bottom orbital velocities from surface-wave parameters." Computers & Geosciences **34**(10). pp.:1243-1262.
- Williams, J. J., Rose, C. P., Thorne, P. D., O'Connor, B. A., Humphery, J. D., Hardcastle, P. J., Moores, S. P., Cooke, J. A. and Wilson, D. J.** (1999). "Field observations and predictions of bed shear stresses and vertical suspended sediment concentration profiles in wave-current conditions." Continental Shelf Research **19**. pp.:507-536.
- Yang, D., Yang, Y. and Costa, V. A. F.** (2009). "Numerical simulation of non-Darcian flow through a porous medium." Particuology **7**(3). pp.:193-198.
- Yip, T. L. and Chwang, A. T.** (1998). "Water wave control by submerged pitching porous plate." Journal of Engineering Mechanics, ASCE **24**(4). pp.:428-434.
- Yu, X. and Chwang, A. T.** (1994). "Wave motion through porous structures." J. Engng Mech. ASCE **120**(5). pp.:989-1008.
- Yu, X., Isobe, M. and Watanabe, A.** (1991). "Analysis of wave motion over submerged plate by boundary element method." Proceedings of the International Association for BEM Symposium, Kyoto, Japan pp.:393-402.
- Yu, X. P.** (1995). "Diffraction of water waves by porous breakwaters." Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE **121**(6). pp.:275-282.

**Yueh, C. Y. and Kuo, Y. Y.** (1993). "The nonlinear wave effects by a submerged horizontal plate to the vertical wall." J. Hydraulic Res. **31**(5). pp.:651-664.

# Annexes



*Annexe 1 : modèle analytique de plaque immergée sous la houle  
(calculs et routines Matlab)*

- Région 1 :

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial y^2} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial y} = 0, \quad y = -d \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} = 0, \quad y = 0 \quad (8)$$

- Région 2 :

$$\frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial y^2} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial y} = 0, \quad y = -d \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} = 0, \quad y = 0 \quad (11)$$

- Région 3 :

$$\frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial y^2} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \varphi_3}{\partial y} = 0, \quad y = -s \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_3}{\partial y} = 0, \quad y = 0 \quad (14)$$

- Région 4 :

$$\frac{\partial^2 \varphi_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_4}{\partial y^2} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial \varphi_4}{\partial y} = 0, \quad y = -d \quad (16)$$

$$\frac{\partial \varphi_4}{\partial y} = 0, \quad y = -s - e \quad (17)$$

Les potentiels de vitesse et les vitesses horizontales sont continus aux interfaces  $x = -a$  et  $x = a$  ( $a$  étant la demi-longueur de la plaque); on obtient donc :

- En  $x = -a$  :

$$\varphi_1 = \varphi_3 \quad (18)$$

$$\varphi_1 = \varphi_4 \quad (19)$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} = \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} \quad (20)$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} = \frac{\partial \varphi_4}{\partial x} \quad (21)$$

- En  $x = a$  :

$$\varphi_3 = \varphi_2 \quad (22)$$

$$\varphi_4 = \varphi_2 \quad (23)$$

$$\frac{\partial \varphi_3}{\partial x} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \quad (24)$$

$$\frac{\partial \varphi_4}{\partial x} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \quad (25)$$

Loin de la plaque, le potentiel de vitesse satisfait à la condition de radiation suivante :

$$\lim_{x \rightarrow \mp \infty} \left( \frac{\partial(\mp i k_0)}{\partial x} \right) (\varphi_2, \varphi_1 - \varphi_{in}) \quad (26)$$

Où  $k_0$  est le nombre d'onde à la profondeur  $d$  et où  $\varphi_{in}$  est le potentiel de vitesse de la vague incidente (onde progressive dans la direction positive des  $x$ ), défini comme :

$$\varphi_{in}(x, y, t) = -\frac{ia_{pot}}{2} e^{ik_0(x+a)} \left( \frac{\cosh k_0(d+y)}{\cosh k_0 d} \right) e^{-i\omega t} \quad (27)$$

$\omega$  étant la fréquence angulaire satisfaisant à la relation de dispersion :

$$\omega^2 = g k_0 \tanh(k_0 d) \quad (28)$$

Solutions analytiques dans chaque région (Patarapanich, 1984; Guizien, 1996) :

- Dans la région 1, le mouvement est la superposition d'une vague incidente et de vagues réfléchies. On obtient la solution aux équations (6), (7), (8) et (26) par la méthode de séparation des variables :

$$\varphi_1(x, y, t) = \sum_{m=0}^{\infty} [I_m e^{k_m(x+a)} + a_m e^{-k_m(x+a)}] \left( \frac{\cos k_m(d+y)}{\cos k_m d} \right) e^{-i\omega t} \quad (29)$$

Où les  $k_m$  ( $m=1, 2, 3, \dots$ ) sont les racines positives de la relation de dispersion :

$$\omega^2 = -g k_m \tan(k_m d) \quad (30)$$

- Dans la région 2 :

$$\varphi_2(x, y, t) = \sum_{m=0}^{\infty} [b_m e^{k_m(x-a)}] \left( \frac{\cos k_m(d+y)}{\cos k_m d} \right) e^{-i\omega t} \quad (31)$$

- Dans la région 3, le potentiel de vitesse est tel que :

$$\varphi_3(x, y, t) = [c_{10} \cos(p_0 x) + c_{20} \sin(p_0 x)] \left( \frac{\cos p_0(s+y)}{\cos p_0 s} \right) e^{-i\omega t} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[ c_{1m} \frac{\cosh(p_m x)}{\cosh(p_m a)} + c_{2m} \frac{\sinh(p_m x)}{\sinh(p_m a)} \cos p_m s + y \cos p_m s e^{-i\omega t} \right] \quad (32)$$

Où les  $p_m$  ( $m=1, 2, 3, \dots$ ) sont les racines positives de la relation de dispersion :

$$\omega^2 = -g p_m \tan(p_m s) \quad (33)$$

- Enfin, dans la région 4, le potentiel de vitesse satisfaisant les équations (15), (16), (17) et (26) est donné par :

$$\varphi_4(x, y, t) = (d_{10} x + d_{20}) e^{-i\omega t} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[ d_{1m} \frac{\cosh(r_m x)}{\cosh(r_m a)} + d_{2m} \frac{\sinh(r_m x)}{\sinh(r_m a)} \right] (\cos r_m (d + y)) e^{-i\omega t} \quad (34)$$

Avec :

$$r_m = \frac{m\pi}{d-s-e} \quad (35)$$

Les coefficients  $a_m$ ,  $b_m$ ,  $c_{1m}$ ,  $c_{2m}$ ,  $d_{1m}$  et  $d_{2m}$  sont déterminés par un raccordement sur la base des fonctions propres et à partir des équations (22) et (24) :

- En  $x = -a$  :

$$\int_{-d}^0 \varphi_1 \cos k_n (d + y) dy = \int_{-s}^0 \varphi_3 \cos k_n (d + y) dy + \int_{-d}^{-s-e} \varphi_4 \cos k_n (d + y) dy \quad (36)$$

- En  $x = a$  :

$$\int_{-d}^0 \varphi_2 \cos k_n (d + y) dy = \int_{-s}^0 \varphi_3 \cos k_n (d + y) dy + \int_{-d}^{-s-e} \varphi_4 \cos k_n (d + y) dy \quad (37)$$

- En  $x = -a$  :

$$\int_{-s}^0 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \cos p_n(s+y) dy = \int_{-s}^0 \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} \cos p_n(s+y) dy \quad (38)$$

- En  $x = a$  :

$$\int_{-s}^0 \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \cos p_n(s+y) dy = \int_{-s}^0 \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} \cos p_n(s+y) dy \quad (39)$$

- En  $x = -a$  :

$$\int_{-d}^{-s-e} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \cos r_n(d+y) dy = \int_{-d}^{-s-e} \frac{\partial \varphi_4}{\partial x} \cos r_n(d+y) dy \quad (40)$$

- En  $x = a$  :

$$\int_{-d}^{-s-e} \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \cos r_n(d+y) dy = \int_{-d}^{-s-e} \frac{\partial \varphi_4}{\partial x} \cos r_n(d+y) dy \quad (41)$$

Avec  $n = 0, 1, \dots, N$ .

Ces différentes équations ((36) => (41)) sont traitées sous forme matricielle.

Dans la suite, les coefficients recherchés sont représentés par les matrices  $\vec{A}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{C}_1$ ,  $\vec{C}_2$ ,  $\vec{D}_1$  et  $\vec{D}_2$  et les matrices  $DA$ ,  $CA$ ,  $AD$ ,  $AC$ ,  $\vec{S}_1$ ,  $\vec{S}_4$ ,  $\vec{S}_3$ ,  $U1$ ,  $U2$ ,  $T1$  et  $T2$  sont données dans la routine « *remplimatrix.m* » en annexe.

$$\vec{D}_1 \cdot \vec{D}_2 = a_{pot} \vec{S}_4 + DA \cdot \vec{A} \quad (42)$$

$$\vec{C}_1 \cdot \vec{C}_2 = a_{pot} \vec{S}_3 + CA \cdot \vec{A} \quad (43)$$

$$\vec{A} = a_{pot} \vec{S}_1 + AD \cdot [U_1 \cdot \vec{D}_1 + U_2 \cdot \vec{D}_2] + AC \cdot [T_1 \cdot \vec{C}_1 + T_2 \cdot \vec{C}_2] \quad (44)$$

$$\vec{D}_1 \cdot \vec{D}_2 = a_{pot} e^{2ik_0 a} \vec{S}_4 + DA \cdot \vec{B} \quad (45)$$

$$\vec{C}_1 \cdot \vec{C}_2 = a_{pot} e^{2ik_0 a} \vec{S}_3 + CA \cdot \vec{B} \quad (46)$$

$$\vec{B} = a_{pot} e^{2ik_0 a} \vec{S}_1 + AD \cdot [U_1 \cdot \vec{D}_1 - U_2 \cdot \vec{D}_2] + AC \cdot [T_1 \cdot \vec{C}_1 - T_2 \cdot \vec{C}_2] \quad (47)$$

Le calcul des coefficients  $a_m$ ,  $b_m$ ,  $c_{1m}$ ,  $c_{2m}$ ,  $d_{1m}$  et  $d_{2m}$  est effectué dans la routine « *coefficients.m* ».

Grâce à ces coefficients, les potentiels de vitesse sont exprimés dans chaque région et par suite les vitesses en chaque point, ainsi que l'élévation de surface libre et les coefficients de transmission et de réflexion de la plaque sont calculés (routine « *hplate.m* »).

Le tout est visualisé à l'aide d'une interface créée par « *plate.m* » (programme à lancer, en annexe, figure II.22).

- 
- « *nbonde.m* » (calcul des nombres d'onde)

```
function k=nbonde(w,h,epsilon,nmax)

%% calcul des nombres d onde par la méthode de Newton-Raphson

global omega profondeur

omega=w;
profondeur=h;

a=pi/h*[0:nmax-1]-pi/2/h;
b=pi/h*[0:nmax-1];
k=pi/h*[0:nmax-1];

for n=2:nmax
    f=eval('airy2(k(n))');
    while abs(f)>epsilon
        if f>0
            b(n)=k(n);
            k(n)=0.5*(k(n)+a(n));
            f=eval('airy2(k(n))');
        else
            a(n)=k(n);
            k(n)=0.5*(k(n)+b(n));
            f=eval('airy2(k(n))');
        end
    end
    k(n+1)=k(n)+pi/h;
end
k(1)=fzero('airy1',0);
if k(1)<0
    k(1)=-k(1);
```

```
end
end
```

```
-----
function f=airy1(k)

global omega profondeur

f=omega^2/9.81-k*tanh(k*profondeur);

end
-----
```

```
function f=airy2(k)

global omega profondeur

f=omega^2/9.81+k*tan(k*profondeur);

end
```

- « remplimatrix.m » (remplissage des matrices pour le calcul des coefficients)

```
function [S4,DA,S3,CA,T1,T2,U1,U2,AC,AD,S1]=remplimatrix(w,h,L,d,e,epsilon,nmax)

%% routines de remplissage des matrices. Ces matrices ont été
% obtenues à partir du raccordement des potentiels sur la base des
% fonctions propres (on passe ensuite à coefficient.m pour le calcul à
% partir de ces matrices)

%% Calcul des nombres d'ondes sur les différents domaines

k=nbonde(w,h,epsilon,nmax);
lambda=nbonde(w,h-d-e,epsilon,nmax);
mu=pi/d*[0:nmax-1];

%% notation des intégrales

I1=h/2*(1-w^4/9.81^2/k(1)^2)+w^2/2/9.81/k(1)^2;

I2=sinh(k(1)*d)/k(1)/cosh(k(1)*h);

I3=-k(1)*sinh(k(1)*(d+e))/(k(1)^2-lambda(1)^2)/cosh(k(1)*h)/cosh(lambda(1)*(h-d-e));

I6=(h-d-e)/2*(1-w^4/9.81^2/lambda(1)^2)+w^2/2/9.81/lambda(1)^2;

I7=d;
```

```

J7=d/2;

for n=2:nmax

    J1(n)=h/2+sin(2*k(n)*h)/k(n)/4;

    J3(n)=-k(1)*sinh(k(1)*(d+e))/cosh(k(1)*h)/(k(1)^2+lambda(n)^2);

    I4(n)=sin(k(n)*d)/k(n);

    I5(n)=-k(n)*sin(k(n)*(d+e))/cosh(lambda(1)*(h-d-e))/(k(n)^2+lambda(1)^2);

    J6(n)=(h-d-e)/2+sin(2*lambda(n)*(h-d-e))/lambda(n)/4;

    J2(n)=(-1)^(n-1)*k(1)*sinh(k(1)*d)/(k(1)^2+mu(n)^2)/cosh(k(1)*h);

    for m=2:nmax

        J4(n,m)=k(n)*sin(k(n)*d)*(-1)^(m-1)/(k(n)^2-mu(m)^2);

        J5(n,m)=k(n)*sin(k(n)*(d+e))/(lambda(m)^2-k(n)^2);

    end
end

%I2/I7

%I3/I6

%I2/I1

%I3/I1
%pause

%% Remplissage du vecteur colonne S4

S4=J2/J7;
S4(1)=I2/I7;
S4=exp(-i*k(1)*L)*S4';

%% Remplissage de la matrice DA

% colonne 1

for n=2:nmax
    DA(n,1)=J2(n)/J7;
end
DA(1,1)=I2/I7;

% autres

for m=2:nmax
    DA(1,m)=I4(m)/I7;
    for n=2:nmax
        DA(n,m)=J4(m,n)/J7;
    end
end
end

```



```

%% remplissage du vecteur colonne S3

for n=2:nmax
    S3(n)=J3(n)/J6(n);
end
S3(1)=I3/I6;
S3=exp(-i*k(1)*L)*S3';

%% remplissage de la matrice CA

% colonne 1

for n=2:nmax
    CA(n,1)=J3(n)/J6(n);
end
CA(1,1)=I3/I6;

for m=2:nmax
    CA(1,m)=I5(m)/I6;
    for n=2:nmax
        CA(n,m)=J5(m,n)/J6(n);
    end
end

%% remplissage de la matrice diagonale U1

U1=zeros(nmax);
for n=2:nmax
    U1(n,n)=-mu(n)*tanh(mu(n)*L);
end

%% remplissage de la matrice diagonale U2

U2=zeros(nmax);
for n=2:nmax
    U2(n,n)=mu(n)/tanh(mu(n)*L);
end
U2(1,1)=1/L;

%% remplissage de la matrice diagonale T1

T1=zeros(nmax);
for n=2:nmax
    T1(n,n)=-lambda(n)*tanh(lambda(n)*L);
end
T1(1,1)=lambda(1)*tan(lambda(1)*L);

%% remplissage de la matrice diagonale T2

T2=zeros(nmax);
for n=2:nmax
    T2(n,n)=lambda(n)/tanh(lambda(n)*L);
end
T2(1,1)=lambda(1)/tan(lambda(1)*L);

%% remplissage de la matrice AC

for n=2:nmax
    AC(1,n)=i/k(1)*J3(n)/I1;

```

```

end
AC(1,1)=i/k(1)*I3/I1;
for n=2:nmax
    AC(n,1)=I5(n)/k(n)/J1(n);
    for m=2:nmax
        AC(n,m)=J5(n,m)/k(n)/J1(n);
    end
end

%% remplissage de la matrice AD

for n=2:nmax
    AD(1,n)=i/k(1)*J2(n)/I1;
end
AD(1,1)=i/k(1)*I2/I1;
for n=2:nmax
    AD(n,1)=I4(n)/k(n)/J1(n);
    for m=2:nmax
        AD(n,m)=J4(n,m)/k(n)/J1(n);
    end
end

%% remplissage du vecteur colonne S1

S1=zeros(nmax,1);
S1(1)=exp(-i*k(1)*L);
end

```

- « coefficients.m » (calcul des coefficients)

```

function [A,B,C1,C2,D1,D2]=coefficient(w,h,L,d,e,amp,epsilon,nmax)

%% calcul des coefficients des séries pour les potentiels de vitesse dans chaque
domaine

i=sqrt(-1);

%% calcul des nombres d ondes sur les différents domaines

k=nbonde(w,h,epsilon,nmax);
lambda=nbonde(w,h-d-e,epsilon,nmax);
mu=pi/d*[0:nmax-1];
apot=amp*9.81/w;

%% remplissage matrices

[S4,DA,S3,CA,T1,T2,U1,U2,AC,AD,S1]=remplimatrix(w,h,L,d,e,epsilon,nmax);

%% calculs

% somme de A et B

SAB=(eye(nmax)-AC*T1*CA-AD*U1*DA)\(apot*(1-
exp(2*i*k(1)*L))*S1+apot*(1+exp(2*i*k(1)*L))*(AC*T1*S3+AD*U1*S4));

```

```

% différence de A et B

DAB=(eye(nmax)+AC*T2*CA+AD*U2*DA)\(apot*(1+exp(2*i*k(1)*L))*S1+apot*(-
1+exp(2*i*k(1)*L))*(AC*T2*S3+AD*U2*S4));

% calcul de A puis B

A=(SAB+DAB)/2;

B=(SAB-DAB)/2;

C1=(apot*(1+exp(2*i*k(1)*L))*S3+CA*SAB)/2;

C2=(apot*(-1+exp(2*i*k(1)*L))*S3-CA*DAB)/2;

D1=(apot*(1+exp(2*i*k(1)*L))*S4+DA*SAB)/2;

D2=(apot*(-1+exp(2*i*k(1)*L))*S4-DA*DAB)/2;

end

```

- « hplate.m » (calcul des potentiels de vitesse, des élévations de surface libre, des coefficients de réflexion et de transmission)

```

%% Plaque horizontale immergée sous la houle
% -----
% Auteur: Youen Kervella, Ifremer, DYNECO/PHYSED (2007)
% adapté de Guizien (1995) et Patarapanich (1984)
% lancer "plate.m" pour la visualisation

function hplaque(T0,h,amp)

%clear all

warning on all
%display('Lecture des variables...')

i=sqrt(-1);
%T0 = 2;           % wave period
w = 2*pi/T0;       % frequency
%h = 1.2;          % water depth
%amp = 0.3;         % wave height
L = 0.5;           % half-length of the plate
e = 0.14;          % width of the plate
d = 0.7;           % depth under the plate
g = 9.8;           % gravitational acceleration
epsilon = 0.00001;

nmax = 20;         % nombre de modes évanescents

xmin = -18.0;
xmax = 18.0;
dx = 0.1;

292

```

```

ymin = 0;
ymax = h;    % à changer en eta quand eta sera calculé
dy = 0.1;

xrange= xmin:dx:xmax; Nx = length(xrange);
yrange= ymin:dy:ymax; Ny = length(yrange);

%% calcul des nombres d'ondes sur les différents domaines

k=nbonde(w,h,epsilon,nmax);
lambda=nbonde(w,(h-d-e),epsilon,nmax);
mu=pi/d*[0:nmax-1];

%% calcul des coefficients des potentiels décomposés sur les bases de
%% fonctions propres

[A,B,C1,C2,D1,D2]=coefficient(w,h,L,d,e,amp,epsilon,nmax);
Ai = A;
Ai(:) = 0;
Ai(1) = amp*g/w;

%% calcul des vitesses orbitales horizontales et verticales

u = zeros (Nx,Ny);
v = zeros (Nx,Ny);
% u1 = zeros (Nx,Ny);
% v1 = zeros (Nx,Ny);
% u2 = zeros (Nx,Ny);
% v2 = zeros (Nx,Ny);
% u3 = zeros (Nx,Ny);
% v3 = zeros (Nx,Ny);
% u4 = zeros (Nx,Ny);
% v4 = zeros (Nx,Ny);
eta = zeros (Nx,1);
eta0 = zeros (Nx,1);

for xi = 1:Nx
    x = xrange (xi);
    for yi = 1:Ny
        y = yrange (yi);

if (x>-L & x<L)
    if y<d
% sous la plaque

B41=zeros(1,nmax);
B42=B41;
B43=B41;
B44=B41;

% for y=1:11
    %y=(ny4-1)*d/10;
    for n=2:nmax
        B41(n)=sinh(mu(n)*x)/cosh(mu(n)*L)*mu(n)*cos(mu(n)*y);
        B42(n)=cosh(mu(n)*x)/sinh(mu(n)*L)*mu(n)*cos(mu(n)*y);
        B43(n)=cosh(mu(n)*x)/cosh(mu(n)*L)*mu(n)*sin(mu(n)*y);
        B44(n)=sinh(mu(n)*x)/sinh(mu(n)*L)*mu(n)*sin(mu(n)*y);
    end
end

```

```

B42(1)=1/L;

%      u4(xi,yi)=B41*D1+B42*D2;
%      u4(xi,yi)=((real(u4(xi,yi)))^2+(imag(u4(xi,yi)))^2)^0.5;
%
%      v4(xi,yi)=B43*D1+B44*D2;
%      v4(xi,yi)=((real(v4(xi,yi)))^2+(imag(v4(xi,yi)))^2)^0.5;

u(xi,yi)=B41*D1+B42*D2;
u(xi,yi)=((real(u(xi,yi)))^2+(imag(u(xi,yi)))^2)^0.5;

v(xi,yi)=B43*D1+B44*D2;
v(xi,yi)=((real(v(xi,yi)))^2+(imag(v(xi,yi)))^2)^0.5;

end

if y>(d+e)
% au dessus de la plaque

B31=zeros(1,nmax);
B32=B31;
B33=B31;
B34=B31;

for n=2:nmax
    B31(n)=sinh(lambda(n)*x)/cosh(lambda(n)*L)*lambda(n)*cos(lambda(n)*(y-d-
e));
    B32(n)=cosh(lambda(n)*x)/sinh(lambda(n)*L)*lambda(n)*cos(lambda(n)*(y-d-
e));
    B33(n)=-cosh(lambda(n)*x)/cosh(lambda(n)*L)*lambda(n)*sin(lambda(n)*(y-d-
e));
    B34(n)=-sinh(lambda(n)*x)/sinh(lambda(n)*L)*lambda(n)*sin(lambda(n)*(y-d-
e));
end
    B31(1)=-sin(lambda(1)*x)/cos(lambda(1)*L)*lambda(1)*cosh(lambda(1)*(y-d-
e))/cosh(lambda(1)*(h-d-e));
    B32(1)=cos(lambda(1)*x)/sin(lambda(1)*L)*lambda(1)*cosh(lambda(1)*(y-d-
e))/cosh(lambda(1)*(h-d-e));
    B33(1)=cos(lambda(1)*x)/cos(lambda(1)*L)*lambda(1)*sinh(lambda(1)*(y-d-
e))/cosh(lambda(1)*(h-d-e));
    B34(1)=sin(lambda(1)*x)/sin(lambda(1)*L)*lambda(1)*sinh(lambda(1)*(y-d-
e))/cosh(lambda(1)*(h-d-e));

%      u3(xi,yi)=B31*C1+B32*C2;
%      u3(xi,yi)=((real(u3(xi,yi)))^2+(imag(u3(xi,yi)))^2)^0.5;
%
%      v3(xi,yi)=B33*C1+B34*C2;
%      v3(xi,yi)=((real(v3(xi,yi)))^2+(imag(v3(xi,yi)))^2)^0.5;
u(xi,yi)=B31*C1+B32*C2;
u(xi,yi)=((real(u(xi,yi)))^2+(imag(u(xi,yi)))^2)^0.5;

v(xi,yi)=B33*C1+B34*C2;
v(xi,yi)=((real(v(xi,yi)))^2+(imag(v(xi,yi)))^2)^0.5;

end
if (y>=d & y<=d+e)

```

```

    % dans la plaque

B51=zeros(1,nmax);
B52=B51;
B53=B51;
B54=B51;

% for y=1:11
    %y=(ny3-1)*(h-d-e)/10+d+e;
    for n=2:nmax
        B51(n)=0;
        B52(n)=0;
        B53(n)=0;
        B54(n)=0;
    end
    B51(1)=0;
    B52(1)=0;
    B53(1)=0;
    B54(1)=0;

    u(xi,yi)=B51*C1+B52*C2;
    u(xi,yi)=((real(u(xi,yi)))^2+(imag(u(xi,yi)))^2)^0.5;

    v(xi,yi)=B53*C1+B54*C2;
    v(xi,yi)=((real(v(xi,yi)))^2+(imag(v(xi,yi)))^2)^0.5;

end
end

if (x<=-L)

    % en amont de la plaque

B11=zeros(1,nmax);
B12=B11;
B13=B11;
B14=B11;
%eta11=B11;
%eta12=B11;

% for y=1:11
    %y=(ny4-1)*d/10;
    for n=2:nmax
        B11(n)=0;
        B12(n)=k(n)*exp(k(n)*(x+L))*cos(k(n)*y);
        B13(n)=0;
        B14(n)=-k(n)*exp(k(n)*(x+L))*sin(k(n)*y);
        %eta11(n)=0;
        %eta12(n)=exp(k(n)*(x+L))*cos(k(n)*h);
    end

    B11(1)=i*k(1)*exp(i*k(1)*x)*cosh(k(1)*y*0.01)/cosh(k(1)*h);
    B12(1)=-i*k(1)*exp(-i*k(1)*(x+L))*cosh(k(1)*y*0.01)/cosh(k(1)*h);
    B13(1)=k(1)*exp(i*k(1)*x)*sinh(k(1)*y*0.01)/cosh(k(1)*h);
    B14(1)=k(1)*exp(-i*k(1)*(x+L))*sinh(k(1)*y*0.01)/cosh(k(1)*h);
    %eta11(1)=exp(i*k(1)*x);
    %eta12(1)=exp(-i*k(1)*(x+L));

```

```

%      u1(xi,yi)=B11*Ai+B12*A;
%      u1(xi,yi)=((real(u1(xi,yi)))^2+(imag(u1(xi,yi)))^2)^0.5;
%
%      v1(xi,yi)=B13*Ai+B14*A;
%      v1(xi,yi)=((real(v1(xi,yi)))^2+(imag(v1(xi,yi)))^2)^0.5;
u(xi,yi)=B11*Ai+B12*A;
u(xi,yi)=((real(u(xi,yi)))^2+(imag(u(xi,yi)))^2)^0.5;

v(xi,yi)=B13*Ai+B14*A;
v(xi,yi)=((real(v(xi,yi)))^2+(imag(v(xi,yi)))^2)^0.5;

end

if (x>=L)

% en aval de la plaque

B21=zeros(1,nmax);
B22=B21;
B23=B21;
B24=B21;
%eta21=B21;
%eta22=B21;

% for y=1:11
    %y=(ny4-1)*d/10;
    for n=2:nmax
        B21(n)=0;
        B22(n)=-k(n)*exp(-k(n)*(x-L))*cos(k(n)*y);
        B23(n)=0;
        B24(n)=-k(n)*exp(-k(n)*(x-L))*sin(k(n)*y);
        %eta21(n)=0;
        %eta22(n)=exp(-k(n)*(x-L))*cos(k(n)*h);
    end

    B21(1)=i*k(1)*exp(i*k(1)*x)*cosh(k(1)*y*0.01)/cosh(k(1)*h);
    B22(1)=i*k(1)*exp(i*k(1)*(x-L))*cosh(k(1)*y*0.01)/cosh(k(1)*h);
    B23(1)=k(1)*exp(i*k(1)*x)*sinh(k(1)*y*0.01)/cosh(k(1)*h);
    B24(1)=k(1)*exp(i*k(1)*(x-L))*sinh(k(1)*y*0.01)/cosh(k(1)*h);

%      u2(xi,yi)=B21*Ai+B22*B;
%      u2(xi,yi)=((real(u2(xi,yi)))^2+(imag(u2(xi,yi)))^2)^0.5;
%
%      v2(xi,yi)=B23*Ai+B24*B;
%      v2(xi,yi)=((real(v2(xi,yi)))^2+(imag(v2(xi,yi)))^2)^0.5;
u(xi,yi)=B21*Ai+B22*B;
u(xi,yi)=((real(u(xi,yi)))^2+(imag(u(xi,yi)))^2)^0.5;

v(xi,yi)=B23*Ai+B24*B;
v(xi,yi)=((real(v(xi,yi)))^2+(imag(v(xi,yi)))^2)^0.5;

end

end

end

```

```

%% calcul de la surface libre

eta11=zeros(1,nmax);
eta12=zeros(1,nmax);
eta21=zeros(1,nmax);
eta22=zeros(1,nmax);
eta31=zeros(1,nmax);
eta32=zeros(1,nmax);

xrangeeta= xmin:0.01:xmax; Nxeta = length(xrangeeta);

for xi=1:Nxeta
    x = xrangeeta(xi);

    eta0(xi)=amp*i*exp(i*k(1)*x);

    if (x<=-L)
        for n=2:nmax
            eta11(n)=0;
            eta12(n)=exp(k(n)*(x+L))*cos(k(n)*h);
        end

        eta11(1)=exp(i*k(1)*x);
        %eta12(1)=0;
        eta12(1)=exp(-i*k(1)*(x+L));

        eta(xi)=i*w/g*(eta11*Ai+eta12*A);
        %eta(xi)=((real(eta(xi)))^2+(imag(eta(xi)))^2)^0.5;
    end

    if (x>-L & x<L)
        for n=2:nmax
            eta31(n)=cosh(lambda(n)*x)/cosh(lambda(n)*L)*cos(lambda(n)*(h-d-e));
            eta32(n)=sinh(lambda(n)*x)/sinh(lambda(n)*L)*cos(lambda(n)*(h-d-e));
        end

        eta31(1)=cos(lambda(1)*x)/cos(lambda(1)*L);
        eta32(1)=sin(lambda(1)*x)/sin(lambda(1)*L);

        eta(xi)=i*w/g*(eta31*C1+eta32*C2);
        %eta(xi)=((real(eta(xi)))^2+(imag(eta(xi)))^2)^0.5;
    end

    if (x>=L)
        for n=2:nmax
            eta21(n)=0;
            eta22(n)=exp(-k(n)*(x-L))*cos(k(n)*h);
        end

        eta21(1)=exp(i*k(1)*x);
        eta22(1)=exp(i*k(1)*(x-L));

        eta(xi)=i*w/g*(eta21*Ai+eta22*B);
        %eta(xi)=((real(eta(xi)))^2+(imag(eta(xi)))^2)^0.5;
    end

end

end

```



```

%% calcul temporel

t0 = 0.0; dt = 0.1; T = 3.1;
trange = t0:dt:T; Nt = length (trange);

ut = zeros (Nx,Ny,Nt);
vt = zeros (Nx,Ny,Nt);
u1t = zeros (Nx,Ny,Nt);
v1t = zeros (Nx,Ny,Nt);
u2t = zeros (Nx,Ny,Nt);
v2t = zeros (Nx,Ny,Nt);
u3t = zeros (Nx,Ny,Nt);
v3t = zeros (Nx,Ny,Nt);
u4t = zeros (Nx,Ny,Nt);
v4t = zeros (Nx,Ny,Nt);
etat = zeros (Nxeta,1,Nt);
eta0t = zeros (Nxeta,1,Nt);

for ti=1:Nt-1
    t=trange(ti+1);
    ut(:, :, ti) = real(u*exp(-i*w*t));
    vt(:, :, ti) = real(v*exp(-i*w*t));
    %    u1t(:, :, ti) = u1*exp(i*w*t);
    %    v1t(:, :, ti) = v1*exp(i*w*t);
    %    u2t(:, :, ti) = u2*exp(i*w*t);
    %    v2t(:, :, ti) = v2*exp(i*w*t);
    %    u3t(:, :, ti) = u3*exp(i*w*t);
    %    v3t(:, :, ti) = v3*exp(i*w*t);
    %    u4t(:, :, ti) = u4*exp(i*w*t);
    %    v4t(:, :, ti) = v4*exp(i*w*t);
    etat(:, ti) = real(eta*exp(-i*w*t));
    eta0t(:, ti) = real(eta0*exp(-i*w*t));
end

%% coefficients de réflexion et transmission

CR=A(1)*w/9.81/amp;
CR=((real(CR))^2+(imag(CR))^2)^0.5;

CT=1+B(1)*exp(-i*k(1)*L)*w/9.81/amp;
CT=((real(CT))^2+(imag(CT))^2)^0.5;

%% sauvegarde

filesave='plateresults.mat';
save(filesave, 'xrangeeta', 'etat', 'eta0t', 'CR', 'CT', 'xrange', 'yrange', 'trange', 'dt',
'ut', 'vt');

```

- “plate.m” (visualisation des résultats)

```

function varargout = plate(varargin)
% PLATE M-file for plate.fig
%     PLATE, by itself, creates a new PLATE or raises the existing

```

```

%     singleton*.
%
%     H = PLATE returns the handle to a new PLATE or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%     PLATE('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%     function named CALLBACK in PLATE.M with the given input arguments.
%
%     PLATE('Property','Value',...) creates a new PLATE or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%     applied to the GUI before plate_OpeningFcn gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property application
%     stop. All inputs are passed to plate_OpeningFcn via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help plate

% Last Modified by GUIDE v2.5 16-Jan-2008 17:08:30

%% Begin initialization code - DO NOT EDIT

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @plate_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @plate_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

%% --- Executes just before plate is made visible.

function plate_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin    command line arguments to plate (see VARARGIN)

%load plateresults.mat

L = 0.5;           % half-length of the plate
e = 0.14;          % width of the plate
d = 0.7;           % depth under the plate

```

```

%hold on
rectangle('Position',[-L,d,2*L,e]),grid on;
%plot(xrangeeta,eta0t(:,1)+1.2);
%hold off
axis ([-9 9 0 3]);
xlabel ('L (en m)');
ylabel ('h (en m)');

% Choose default command line output for plate
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes plate wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

%% --- Outputs from this function are returned to the command line.

function varargout = plate_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

%% wave period

function period_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to period (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of period as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of period as a double
%T0=str2double(get(hObject,'String'))

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function period_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to period (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

%% water depth

function depth_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to depth (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of depth as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of depth as a double
%h=str2double(get(hObject,'String'))

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function depth_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to depth (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%% coeff de réflexion

function CR_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to CR (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of CR as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of CR as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function CR_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to CR (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%% coeff de transmission

function CT_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to CT (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of CT as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of CT as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function CT_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to CT (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function height_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to height (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of height as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of height as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function height_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to height (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%% CR^2+CT^2

function sum_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to sum (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of sum as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of sum as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sum_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to sum (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%% --- Executes on button press in pushbutton1.

function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
%handles.current_data = eta0t(2);
%guidata(hObject,handles)
%plot(handles.current_data );

answer1=str2num(get(handles.period,'String'));
answer2=str2num(get(handles.depth,'String'));
answer3=str2num(get(handles.height,'String'));

hplate(answer1,answer2,answer3);
load plateresults.mat

%% sortie des résultats

cr=num2str(CR);
set(handles.CR,'String',cr)

ct=num2str(CT);
set(handles.CT,'String',ct)

Sum=CR^2+CT^2;
set(handles.sum,'String',Sum)

%% plot

L = 0.5;           % half-length of the plate
e = 0.14;          % width of the plate
d = 0.7;           % depth under the plate

Nt = length (trange);
Nx = length(xrange);
Ny = length(yrange);

%% pour affichage des vecteurs vitesse

xfig=[];
utfig=[];
vtfig=[];

for xi=1:2:Nx
    xfig=[xfig xrange(xi)];
    utfig=[utfig;real(ut(xi,:,:))];
    vtfig=[vtfig;real(vt(xi,:,:))];
end

```

```

% bornes de l'affichage pour la vitesse

xminview=-2;
xmaxview=2;

%% graph free surface

for ti=1:Nt-1
axes(handles.fsaxes) % Select the proper axes
set(handles.fsaxes,'XMinorTick','on')
cla, drawnow,
%set(gcf,'renderer','zbuffer')
set(gca,'NextPlot','replacechildren')
hold on;
t=ti*dt;
rectangle('Position',[-L,d,2*L,e]),title([num2str(t),' s']);
plot(xminview,yrange,'k');
plot(xmaxview,yrange,'k');
plot(xrangeeta,eta0t(:,ti)+answer2,'k');
plot(xrangeeta,etat(:,ti)+answer2,'r'); grid on
hold off;
axis ([-18 18 0 answer2+answer3+0.5]);
xlabel ('L (en m)');
ylabel ('h (en m)');
Mov(ti) = getframe(gcf) ;
%mov = addframe(mov,Mov);
pause(0.1);

%% graph velocities

axes(handles.velaxes) % Select the proper axes
set(handles.velaxes,'XMinorTick','on')

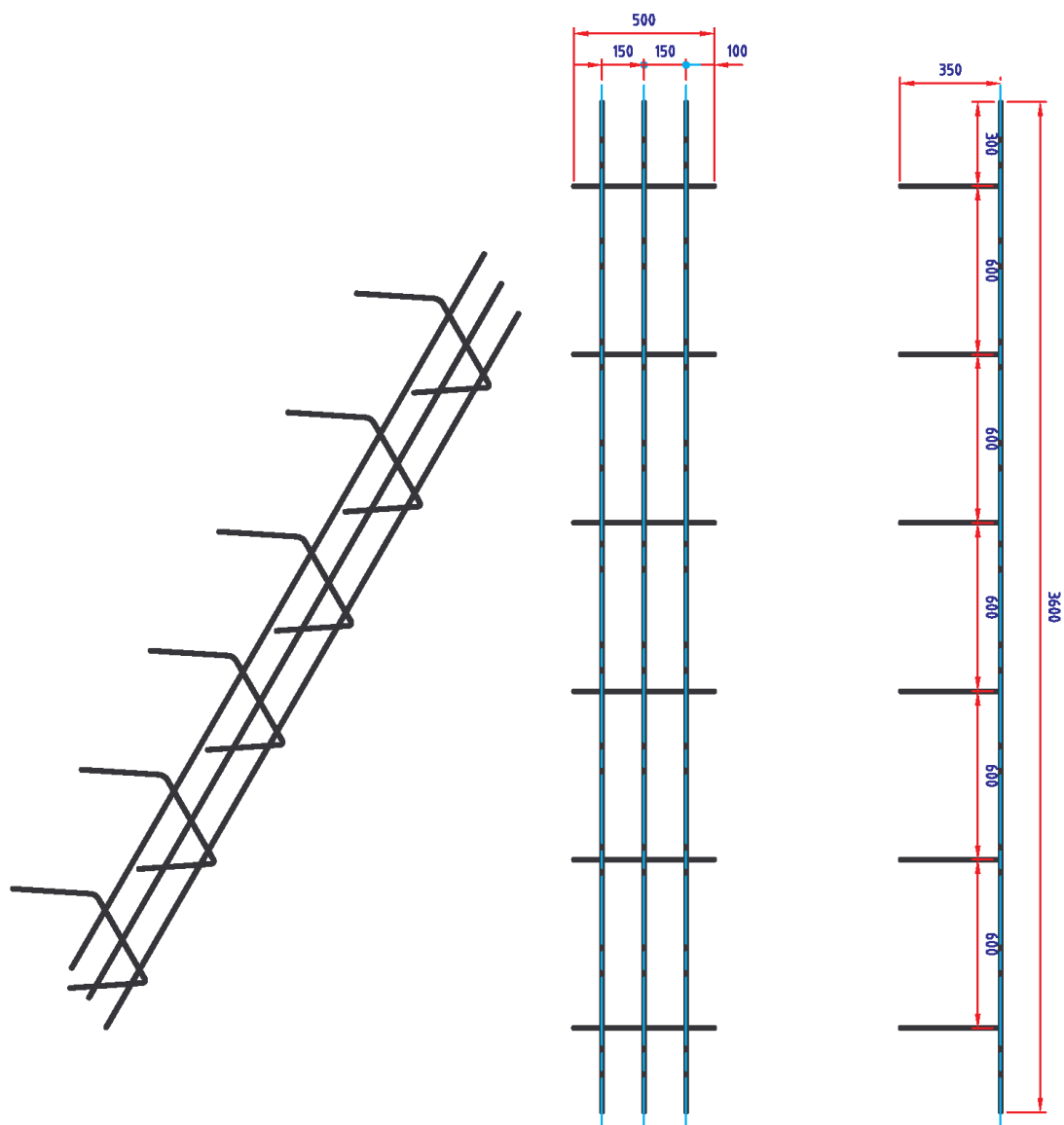
cla, drawnow,
%set(gcf,'renderer','zbuffer')
set(gca,'NextPlot','replacechildren')
hold on;
t=ti*0.1;
rectangle('Position',[-L,d,2*L,e]),title([num2str(t),' s']);
quiver(xfig,yrange,utfig(:,ti),vtfig(:,ti),1,'r'),axis ([xminview xmaxview 0
answer2+0.5]);
h=quiver(xmaxview-0.5,answer2+0.2,0.1,0,1,'r');%,Displayname(0.1);
hold off;



xlabel ('L (en m)');
ylabel ('h (en m)');
Mov(ti) = getframe(gcf) ;
%mov = addframe(mov,Mov);
pause(0.1);

end

```

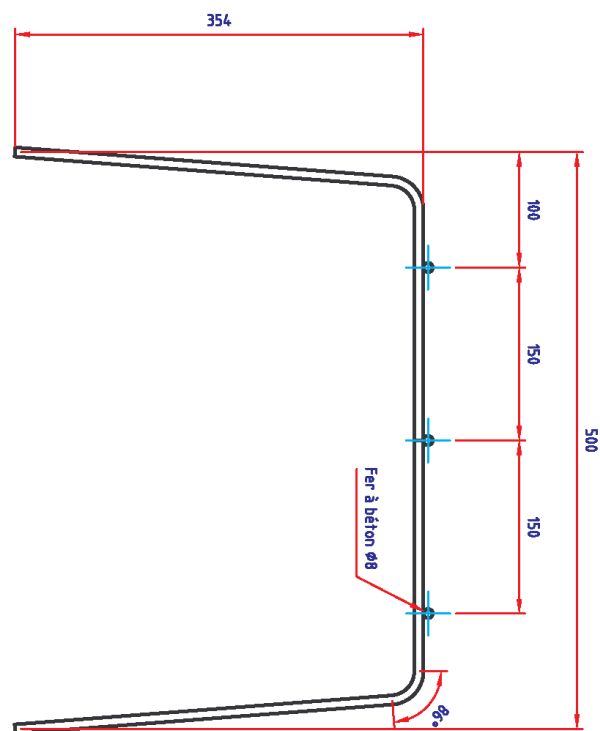
## Annexe 2 : plans des maquettes ostréicoles





 <b>IFREMER</b> INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE POUR L'EXPLOITATION DE LA MER Siège Social technopôlis 40, 155 rue J.-J. Rousseau 92 138 Issy-les-Moulineaux tél: (33) 01-46-48-21-00 - Télec: 631 912-F CENTRE MANCHE-MER DU NORD - BP699 62 321 BOULOGNE SUR MER tél: (33) 03-21-99-56-34 Fax: (33) 03-21-99-56-71		Indice	Modifications		Date	Par
		Verifie par:	<b>ENSEMBLE:</b>  <b>TITRE:</b> TABLE CONCHYLICOLE			
		dessine par: JV.FACQ				
		Date:				
 Tol. gene.: N. analytique Usinage:	Format: A4	Matière: Fer à béton Traitement: galvanisation	DCB-ERT-HO		Ind.	Echelle
						1/15

Ce plan est la propriété d'IFREMER. Il ne peut être communiqué sans autorisation. Toute lecture à l'échelle est proscrite et n'engage aucunement l'IFREMER.





 <b>INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE POUR L'EXPLOITATION DE LA MER</b> Siège Social technopolis 40, 155 rue J.-J. Rousseau 92 138 Issy-les-Moulineaux tél: (33) 01-46-48-21-00 - Téléc: 631 912-F CENTRE MANCHE-MER DU NORD - BP699 62 321 BOULOGNE SUR MER tél: (33) 03-21-99-56-34 Fax: (33) 03-21-99-56-71		Indice	Modifications		Date	Par	
		Verifie par: <b>ENSEMBLE:</b>					
		dessine par: <b>JV.FACQ</b>					
		Date: <b>TITRE: TABLE CONCHYLICOLE</b>					
 N. analytique	Tol. gene.: Usage:	Format: <b>A4</b>	Matière: <b>Fer à béton</b>	Traitement: <b>galvanisation</b>	DCB-ERT-HO	Ind.	Echelle <b>1/5</b>
Ce plan est la propriété d'IFREMER. Il ne peut être communiqué sans autorisation. Toute lecture à l'échelle est proscrite et n'engage aucunement l'IFREMER.							



## Annexe 3 : poster présenté au Salon de l'Ostréiculture 2009

### Suivi de l'évolution verticale d'un banc sableux à vocation ostréicole Cas du banc de Lamouroux

S. KERVELLA<sup>a</sup>, P. GEAIRON<sup>b</sup>, O. LE MOINE<sup>b</sup>, Y. KERVELLA<sup>c</sup>, S. ROBERT<sup>a</sup>

<sup>a</sup> IFREMER, LERPC, Place Gaby Coll, BP7, 17137 L'Houmeau, France, email : stephane.kervella@ifremer.fr et serge.robert@ifremer.fr  
<sup>b</sup> IFREMER, LERPC, Ronce-les-Bains, BP133, 17390 La Tremblade, France, email : philippe.geairon@ifremer.fr et olivier.le.moine@ifremer.fr  
<sup>c</sup> IFREMER, DYNECO-PHYSED, BP 70, 29280 Plozané, France, email : youen.kervella@ifremer.fr

- La pratique de la culture induit un envasement.
- L'exhaussement influe sur la croissance des organismes en diminuant le temps d'immersion.
- La proximité du sédiment est un facteur défavorable au rendement biologique.



**Site atelier :** Banc de Lamouroux

**Pourquoi ? :** Enlèvement périodique des tables.

Cela permet de mesurer les effets des huîtres sur la sédimentation.

**Objectifs :**

- Suivi des variations de la hauteur des sédiments en relation avec la culture des huîtres sur table.
- Action des vagues sur la remise en suspension des biodépôts.

**Suivi à moyen terme :**

- Acquisition bathymétrie de précision
- Acquisition en 2005, 2007 et 2008 et 2009 (en cours)
- Mesure avant l'installation des tables ostréicoles

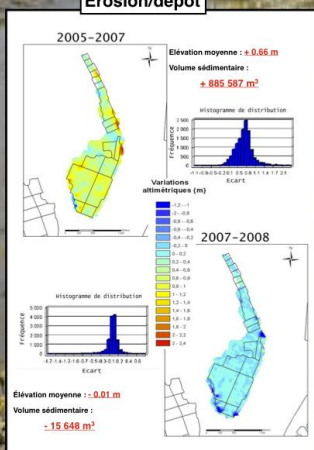
**Suivi à court terme :**

- Utilisation d'un altimètre de grande précision, +/- 2mm
- Installation sous une table ostréicole
- Mesure des variations de la hauteur du sédiment et de la hauteur des vagues
- Acquisition à haute fréquence et en continu (juin 2007 à avril 2008)

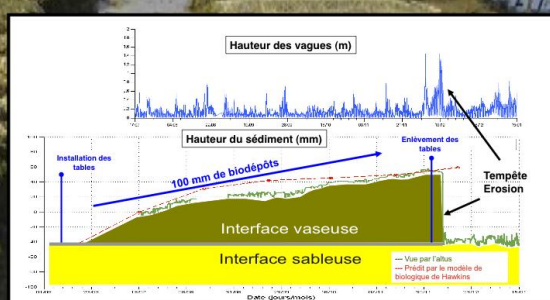


Appareil sur site

**Érosion/dépôt**



**Suivi de l'envasement sous une table ostréicole**



Différentes méthodes d'évaluation donnant des résultats concordants

- La bathymétrie
- Les mesures sur estran (altimètres Altus)
- Le modèle écophysologique de production de biodépôts

**Conclusions**

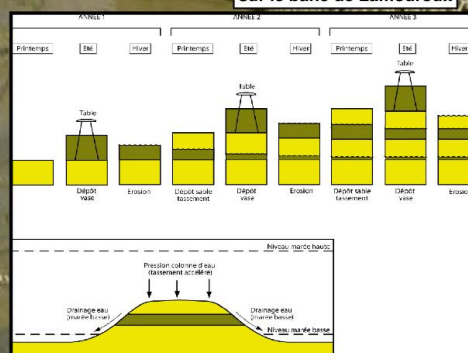
**Période estivale :** L'installation des tables ostréicoles et des huîtres provoque un envasement et un exhaussement rapide des sols (20 mm/mois). A Lamouroux, cela représente un volume de 85 000 m³ et une masse de 53 000 à 62 000 tonnes de vase en 5 mois.

**Période hivernale :** Les tempêtes peuvent déstabiliser et éroder les dépôts de vase. Les épaisseurs érodées varient selon les zones observées. La sédimentation devient sableuse. Ces sables remplacent ou recouvrent les biodépôts estivaux.

**Sur plusieurs années :** Les variations du volume sédimentaire du banc fluctuent beaucoup. La sédimentation est essentiellement sableuse. Ces variations dépendent de la puissance des vagues et dans une moindre mesure de la productivité des huîtres.

**Avec la gestion actuelle des installations ostréicoles (installation saisonnière), la sédimentation sur le banc de Lamouroux est avant tout conditionnée par les mouvements sédimentaires dus aux variations des forçages hydrodynamiques (vagues, clapôts).**

**Cycle sédimentaire sur le banc de Lamouroux**



## Annexe 4 : Article pour les Journées de l'Hydraulique SHF 2009

Bassoullet P., Verney R., Kervella Y., Kervella S., Jestin H., Voineson G. - Utilisation d'un altimètre ALTUS pour l'étude des corrélations avec les caractéristiques de vagues et les interfaces de dépôt

### UTILISATION D'UN ALTIMETRE (ALTUS) DESTINE A LA QUANTIFICATION DES DEPOT/EROSION EN DOMAINE LITTORAL POUR L'ETUDE DES CORRELATIONS AVEC LES CARACTERISTIQUES DE VAGUES ET LES INTERFACES DE DEPOT

*Ability of an acoustic echosounder (Altus) intended to quantify bed level variations in coastal areas to correlation studies with wave features and surficial sediment deposits*

Philippe Bassoullet, Romaric Verney, Youen Kervella, Stéphane Kervella\*, Hervé Jestin, Guillaume Voineson

Ifremer – Centre de Brest, DYNECO/Physed, B.P. 70, 29280 Plouzané, France

\* Ifremer LERPC, Place Gaby Coll, B.P. 5, 17137 L'Houmeau, France

Tél: +33 (0)2 98 22 43 44, Fax: +33 (0)2 98 22 48 64, e-mail: pbassoul@ifremer.fr

#### Résumé :

L'évaluation quantitative fine des séquences d'érosion/dépôt des sédiments superficiels est primordiale pour comprendre les processus et établir des bilans sédimentaires en domaine littoral. Le système ALTUS a été conçu, depuis plus d'une décennie, pour répondre à cet objectif. Les possibilités de mesures offertes par cet altimètre (mesures à court terme ou sur plusieurs mois) sont particulièrement appropriées pour permettre une validation des modèles numériques hydro-sédimentaires.

L'intégration récente d'une carte mémoire de grande capacité a permis d'optimiser ce système. En effet, il est bien établi que la houle est un paramètre clé pour la reprise des sédiments en zones intertidales, gouvernant ainsi le transport sédimentaire. Le système ALTUS, outre l'enregistrement du suivi altimétrique, permet d'accéder aux caractéristiques de vagues (hauteur, période significative, frottement sur le fond...)

Des corrélations peuvent ainsi être établies entre une érosion constatée et la dynamique du milieu (vagues, impacts anthropiques...)

Dans ce papier il est également fait état de tests en laboratoire réalisés dans le but d'évaluer la capacité d'ALTUS à détecter une modification relativement "brutale" des caractéristiques physiques du sédiment des dépôts superficiels.

Title: Ability of an acoustic echosounder (Altus) intended to quantify bed level variations in coastal areas to correlation studies with wave features and surficial sediment deposits

#### Summary:

Quantitative evaluation of erosion/deposition events of surficial sediments is crucial to understand the processes and establish sedimentary budgets in coastal areas. The ALTUS system was designed for more than a decade, to meet this objective. The possibilities offered by this altimeter (short-term or several months measurements) are particularly fitted for validation of sedimentary transport numerical models.

The recent integration of a large capacity memory card has allowed to optimize the system. Indeed, it is well established that wave activity is one of the key parameters for the erosion and hence govern sediment transport in intertidal/shallow water areas. The ALTUS system, in addition to bottom level variation recordings, allows access to wave characteristics (wave height, significant period, bottom shear stress...)

Correlations can be established between a recorded erosion and dynamics (waves, human impact...)

In this paper it is particularly reported laboratory tests carried out in order to assess the ability of ALTUS to detect relatively "rough" changes of the physical characteristics of surficial sediment deposits.

## I INTRODUCTION

L'étude de la dynamique sédimentaire en zones littorales nécessite l'acquisition *in situ* et en continu d'un certain nombre de paramètres relatifs d'une part à l'hydrodynamisme du milieu et d'autre part aux propriétés intrinsèques du sédiment contrôlant sa remise en suspension, son transport et son dépôt.

La mise en évidence de ces mouvements sédimentaires passe par une évaluation quantitative fine de ces séquences d'érosion/dépôt des sédiments superficiels afin d'approcher des bilans sédimentaires locaux ou régionaux. La compréhension de la dynamique de ces dépôts nécessite classiquement des relevés à fréquence variable (bimensuelle, mensuelle...) qui ne permettent cependant pas d'approcher les phénomènes haute



Bassoullet P., Verney R., Kervella Y., Kervella S., Jestin H., Voineson G. - Utilisation d'un altimètre ALTUS pour l'étude des corrélations avec les caractéristiques de vagues et les interfaces de dépôt

fréquence (échelle tidale par exemple). Seule une approche par enregistrements, en continu et à haute fréquence, de l'évolution du niveau de sédiment permet de déterminer les processus mis en jeu pour l'érosion ou l'accrétion des sédiments. Ces divers processus peuvent être : la variation du courant de marée, les houles courtes et longues, les effets de dessèchement du sédiment superficiel en relation avec l'exposition plus ou moins longue au soleil sur les estrans exondés à basse mer et, bien entendu, les modifications des sédiments superficiels dues aux activités biologiques (bioturbation par exemple), ou encore l'effet de drainage.

Depuis plus de dix années la collaboration menée entre Ifremer et la société NKE –Micrel a permis l'élaboration du système ALTUS ("ALTimètre à Ultrasons Submersible"), un sondeur enregistreur acoustique autonome pour le suivi de l'altimétrie du sédiment de surface et, par là même, pour l'évaluation des séquences de dépôt/érosion, avec un échantillonnage à haute fréquence. Les spécifications du système ALTUS sont présentées dans [1]. A court terme par exemple, ce capteur permet une quantification précise (d'ordre millimétrique) des dépôts liés à une étale de marée ; à plus long terme, sur plusieurs mois, il enregistre le suivi de l'évolution sédimentaire d'une vasière ou d'un estran sableux. De nombreuses études utilisant ALTUS ont été menées en zones littorales et estuariennes, en intertidal ou subtidal afin de valider des modèles numériques de transport de sédiments [2], [3] et [4].

De nombreux tests en laboratoire ont notamment été récemment réalisés à Ifremer-Brest afin d'évaluer la capacité d'ALTUS (i) à détecter des faciès sédimentaires différents et (ii) à déterminer des épaisseurs de dépôts sédimentaires de caractéristiques physiques différenciées.

Dans sa version initiale, la capacité mémoire de l'appareil ne permettait pas d'enregistrer la totalité du signal. Récemment, suite à l'intégration d'une carte mémoire de plus grande capacité, il a été testé la possibilité de le faire pour avoir l'intégralité de chaque écho avec l'idée de pouvoir accéder à certaines caractéristiques (*i.e.* type de faciès, "état de consolidation",...) des sédiments superficiels.

Le système permet également d'accéder aux caractéristiques de vagues (hauteur, période significative...).

Après une présentation rapide du système ALTUS et des exemples de déploiements sur le terrain et d'interprétation des résultats, ce papier traite des tests laboratoire permettant d'envisager des développements complémentaires aux données altimétriques actuelles fournies par le système.

## II PRESENTATION DU SYSTEME ALTUS

Basé sur le principe d'un échosondeur classique mais avec une fréquence d'émission d'ondes acoustiques de 2 MHz, le système ALTUS est constitué de deux parties : (1) le transducteur acoustique, positionné à une trentaine de centimètres au-dessus du sédiment et orienté vers le bas, (2) le module enregistreur, déporté du transducteur et relié à lui par un câble. Le temps de trajet depuis l'émission de l'onde acoustique et sa réception par le transducteur est convertie en distance ; la célérité du son dépendant de la température et de la salinité du milieu. Le module comporte un capteur de pression (permettant de connaître la hauteur d'eau sur le site), l'énergie et l'électronique (Fig. 1). Un "crayon" magnétique permet de communiquer avec un PC pour la programmation et le déchargement des données.

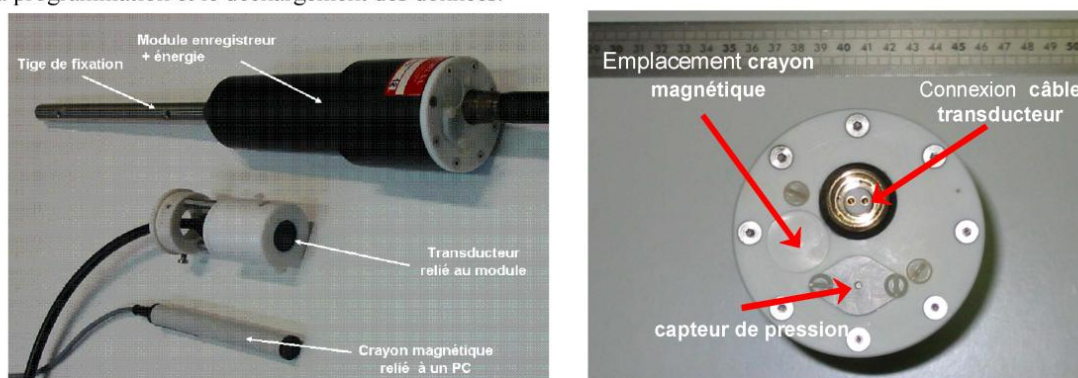


Figure 1 : Système ALTUS

Deux gammes de mesures sont disponibles selon les environnements à investiguer : (1) 20 à 70 cm (avec une précision de  $\pm 2$  mm) et (2) 20 à 200 cm (avec une précision de  $\pm 5$  mm) ; la résolution est de 0.6 mm dans les deux cas.

*Bassoullet P., Verney R., Kervella Y., Kervella S., Jestin H., Voineson G. - Utilisation d'un altimètre ALTUS pour l'étude des corrélations avec les caractéristiques de vagues et les interfaces de dépôt*

Outre l'enregistrement de la cote du fond et de la hauteur d'eau (< 25 m) à la cadence désirée, l'ALTUS acquiert de 1 à 4 seuils de détections d'énergie acoustique reçue. Afin d'optimiser ces seuils, il est nécessaire de les programmer en laboratoire, après étalonnage à partir des types de faciès sédimentaires investigués. Ces seuils permettent de préciser l'interface eau-sédiment et sont des indicateurs de l'état de sédimentation/consolidation des dépôts. Ainsi un dépôt frais de vase liquide sur un fond de vases plus consolidées doit pouvoir être détecté et quantifié.

La fréquence d'échantillonnage maximale est de 2 Hz, en continu ou par salves. Selon les objectifs attendus les cadences de tirs sont programmées en fonction de la capacité mémoire du module ALTUS portée maintenant à 4 Mo.

Une sonde Température – Salinité peut être placée à proximité de l'appareil pour une éventuelle correction de la célérité du son.

### III EXEMPLES D'ENREGISTREMENTS A PARTIR DE DEPLOIEMENTS TERRAIN

#### III.1 SUIVI A MOYEN TERME DES EVOLUTIONS DE NIVEAUX DE SEDIMENT

Des enregistrements sur plusieurs mois ont été réalisés en domaine intertidal ou subtidal, dans divers environnements tels que les bassins de Marennes-Oléron et d'Arcachon, l'estuaire de la Seine ou la baie du Mont Saint-Michel (Fig.2)

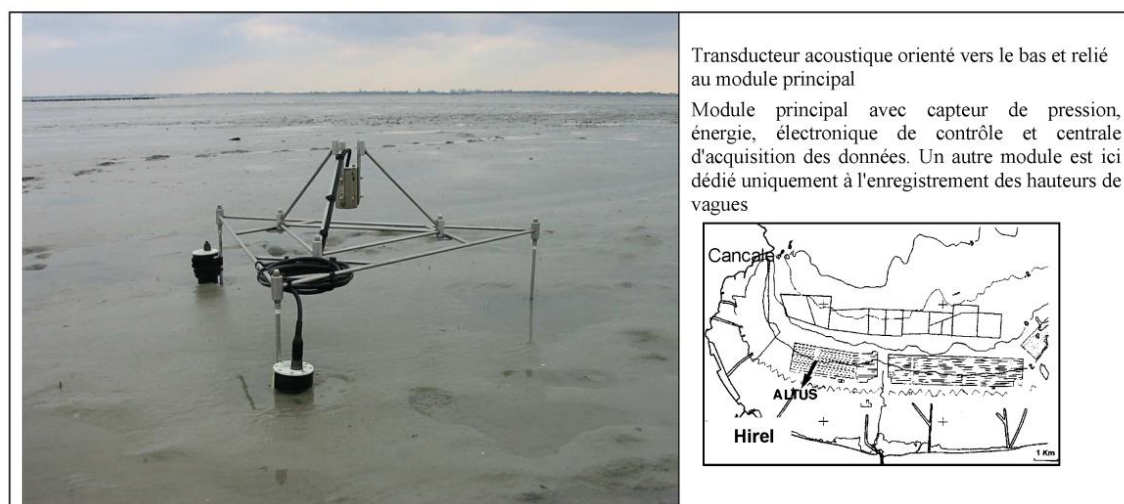


Figure 2 : Exemple de déploiement du système ALTUS en baie du Mont Saint-Michel

La mise en évidence des périodes "actives" en termes de dépôt/érosion a été établie avec ce système, par exemple, pour les sédiments superficiels de la baie du Mont (sur l'estran médian, en secteur occidental), de même que le type de forçage correspondant. Ainsi, dans ce cas précis (Fig.3), l'altimètre a relevé en 2 jours des érosions de 5,5 cm lors d'épisodes de vents de secteur Sud. La recharge continue de l'estran est ensuite perturbée par un coup de vent de secteur Nord, décapant 3 cm de sédiment. Une quantification est ainsi possible selon la nature des forçages en jeu.

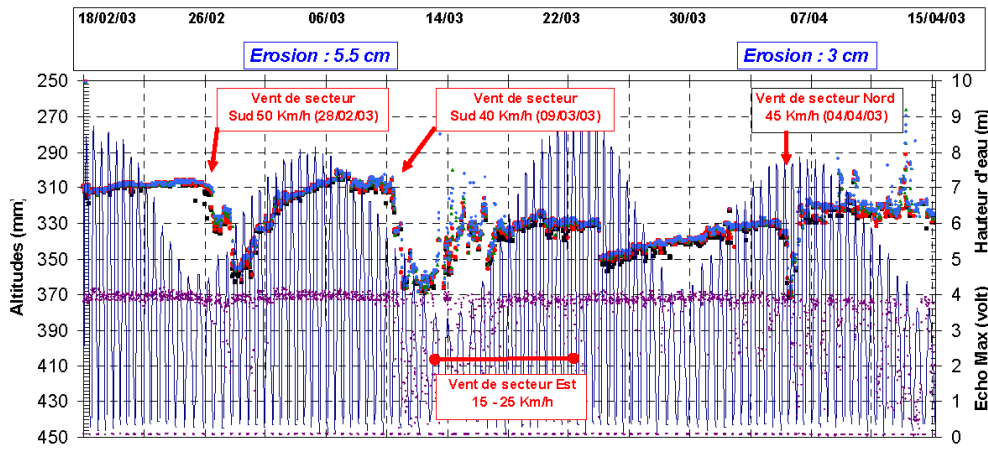


Figure 3 : Enregistrement ALTUS en baie du Mont Saint-Michel (localisation sur la carte de la figure 2)

## III.2 UTILISATION DU SYSTEME ALTUS EN MODE VAGUES

### III.2.1 Traitement des données de pression : mesure des paramètres de vagues avec le Système ALTUS

Le module ALTUS est muni d'un capteur de pression à membrane pouvant fonctionner à 2Hz et permettant d'estimer les hauteurs de vagues en parallèle des enregistrements altimétriques. Afin de réduire au maximum la mémoire utilisée, la pression et l'altimétrie peuvent être enregistrées à des cadences indépendantes.

Le mode "vagues" consiste à acquérir la mesure de pression à 2Hz par salves, i.e. pour un usage classique : une salve de 256 s toutes les 20 ou 30 min. Le signal est ensuite traité via une routine open source développée sous Matlab® pour obtenir les principaux paramètres caractéristiques des vagues : hauteur significative ( $H_s$ ), période moyenne ( $T_m$ ) et période représentative ( $T_r$ ), vitesse orbitale représentative ( $U_{br}$ ) et tension sur le fond ( $\tau_w$ ). La procédure est brièvement présentée ci-après.

Le signal de pression brut est préalablement corrigé de l'atténuation due à la profondeur. Le signal corrigé est ensuite traité par analyse spectrale pour calculer les principaux paramètres :

$$H_{sig} = 4\sqrt{m_0} = 4\sqrt{\int S_p(f) df} \approx 4\sqrt{\sum S_p(fi) \Delta fi} \quad (1)$$

$$T_m = \frac{m_0}{m_1} = \frac{\sum S_p(fi) \Delta fi}{\sum fi S_p(fi) \Delta fi} \quad (2)$$

où  $m_0$  et  $m_1$  sont respectivement les moments d'ordre 0 et 1 et  $S_p$  le spectre du signal de pression obtenu par transformation de Fourier. La relation entre vitesse orbitale et pression pour chaque bande spectrale  $i$  est donnée ci-dessous :

$$S_{u,i} = \frac{4\pi^2}{T_i^2 \sinh^2(k_i h)} S_{p,i} \quad (3)$$

La relation (3) permet de calculer la période et la vitesse orbitale représentatives

$$T_r = \frac{\sum S_{u,i}(fi) \Delta fi}{\sum fi S_{u,i}(fi) \Delta fi} \quad (4)$$

$$U_{br} = \sqrt{2 \sum \left[ \frac{4\pi^2}{T_i^2 \sinh^2(k_i h)} S_{p,i} \Delta fi \right]} \quad (5)$$



Bassoullet P., Verney R., Kervella Y., Kervella S., Jestin H., Voineson G. - Utilisation d'un altimètre ALTUS pour l'étude des corrélations avec les caractéristiques de vagues et les interfaces de dépôt

Supposant connue la rugosité du fond  $z_0$  (dépendant entre autres de la nature et de la forme du fond, de la présence de végétation ou d'espèces benthiques, voir [5]), il est alors possible de calculer le terme de friction  $f_{rw}$  et la tension de cisaillement induite par les vagues,  $\tau_w$ .

$$f_{rw} = 1.39 \left( \frac{U_{br} T_r}{2\pi z_0} \right)^{-0.52} \quad (6)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_{rw} U_{br}^2 \quad (7)$$

Il est important de rappeler l'influence du choix de la valeur de la rugosité, qui peut faire varier de plusieurs ordres de grandeur la tension de cisaillement pour un même forçage vague.

### III.2.2 Exemple d'enregistrement de corrélations variations de hauteurs du sédiment superficiel – hauteur des vagues

L'enregistrement des variations de hauteur du sédiment sur plusieurs mois en station 8 du secteur ostréicole de Marennes-Oléron met en évidence une brusque variation de 9 cm le 9 décembre 2007 (Fig. 4). A cette station le sédiment, de type vase, se dépose sur un faciès sableux. Durant plus de 2 mois, en conditions hydrodynamiques calmes, il est constaté un dépôt continu de 3 cm de vase. Deux épisodes de tempêtes suivent avec des hauteurs significatives de vagues notables : un épisode ponctuel dans le temps (V1), suivi quelques jours plus tard d'un épisode plus intense et de durée plus longue (V2). L'analyse des corrélations de ces vagues enregistrées avec l'ALTUS avec l'évolution de la hauteur du sédiment permet de conclure à une certaine liquéfaction du sédiment au cours de la 1<sup>ère</sup> tempête favorisant ainsi son érosion (9 cm) lors de la tempête suivante, plus marquée.

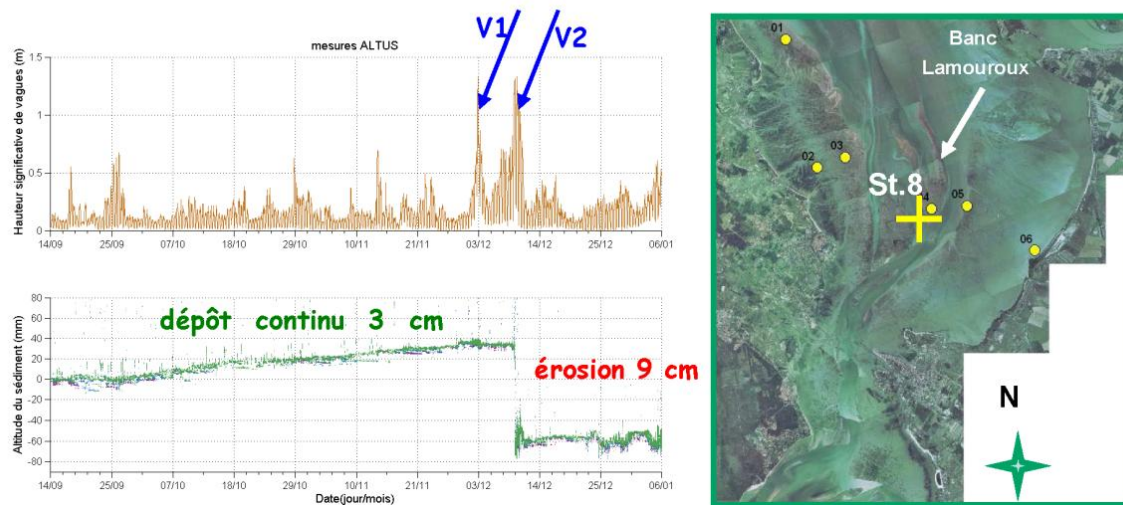


Figure 4 : Enregistrement ALTUS (environ 4 mois) en baie de Marennes-Oléron - St. 8 - (Côte Atlantique, France)

## IV TESTS EXPERIMENTAUX EN LABORATOIRE

Ce type d'enregistrement nous a conduits à nous intéresser au matériel sédimentaire lui-même afin de rechercher les éventuelles potentialités du système ALTUS à détecter des sédiments de caractéristiques physiques différentes, à partir de l'enregistrement de la totalité du signal acoustique de retour. Pour ce faire, des carottes "artificielles" ont été reconstituées par dépôts successifs (de 5 à 20 mm) de sédiments de granulométrie variée sur divers types de faciès sédimentaires (Fig. 5) ; ces alternances de dépôts ayant été observées sur le terrain.



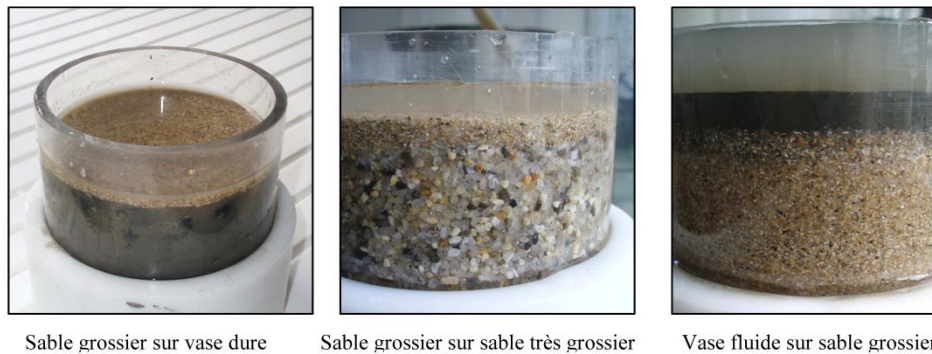


Figure 5 : Exemples d'interfaces reconstituées et testées en laboratoire avec ALTUS

Ainsi, les tests en laboratoire ont été menés afin de vérifier les capacités de réponse de l'ALTUS vis-à-vis (1) de la précision de la mesure du niveau de surface du sédiment, (2) de la capacité à détecter un faciès particulier (sable grossier, sable fin, vase fine et mélange de type vase sableuse) et enfin, (3) à détecter une interface franche entre deux faciès contrastés : sable fin sur sable grossier, vase sur sable et vase fine fluide sur vase compactée. L'objectif étant de rechercher si, à partir de l'enregistrement de l'intégralité du signal rétrodiffusé, il était possible de mettre en évidence des caractéristiques physiques des divers faciès.

La description des tests et les résultats sont commentés dans [6]. Ils ont portés sur 5 faciès différenciés depuis les sables très grossiers jusqu'à la vase fine, en passant par des sables grossiers ( $D_{50} : 497 \mu\text{m}$ ) et des sables fins ( $D_{50} : 192 \mu\text{m}$ ). Pour la vase, deux teneurs en eau ont été testées afin d'obtenir une interface type "crème de vase" et une interface de vase consolidée.

La précision de la détection de l'interface eau-sédiment mise en évidence lors de ces tests en laboratoire est, en moyenne, de 0.8 mm ; elle est meilleure pour un sable fin et moins bonne (1 mm) pour une couche de type crème de vase. Cette précision peut être portée à 3 mm lorsqu'elle est affectée par le facteur température qui modifie la célérité de l'onde dans le milieu.

La connaissance du type de sédiment de surface est également importante vis-à-vis de la célérité de propagation. Les valeurs couramment utilisées sont : 1500 m/s pour une vase fluide, 1640 m/s pour un sable fin, 1780 m/s pour un sable grossier et 1870 m/s dans le cas de sables très grossiers.

Les principales constatations portant sur la détermination de l'épaisseur du dépôt supérieur sont :

- a) *dans le cas de faciès sableux* : une très bonne détection de l'interface sable/sable pour des dépôts supérieurs de 5 à 20 mm, à condition que les distributions granulométriques soient très tranchées : sable fin / sable grossier à très grossier. Une mauvaise pénétration du signal est relevée si ces distributions sont proches (de type sable fin / sable moyen ou sable grossier / sable très grossier)
- b) *dans le cas de faciès vaseux* : une très bonne détection (erreur de 0.1 à 2 mm) lorsqu'une couche type crème de vase (CV), d'épaisseur 5 à 20 mm, surmonte une vase consolidée
- c) *dans le cas de sédiments mixtes* : (i) mauvaise détection d'une CV d'épaisseur inférieure à 10 mm surmontant un sable, (ii) bonne détection d'une couche (< 10 mm) de sable très grossier sur une vase consolidée ; détection déficiente par contre si ce sable est fin à grossier.

## V CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le système ALTUS a été élaboré pour acquérir des données précises de variations de niveau du sédiment, que ce dernier soit vaseux, sableux ou un mélange de ces deux faciès. La possibilité d'acquérir avec ALTUS les données de caractéristiques de vagues en complément de ces données altimétriques permet d'interpréter avec plus de précisions la dynamique des sédiments (notamment quant à l'origine des forçages).

Par expérimentations en laboratoire, à partir de dépôts bien contrastés tels que : crème de vase sur vase consolidée, sables fins sur sables grossiers ou très grossiers de même que crème de vase sur sables, il est possible de quantifier avec une précision millimétrique, une épaisseur du dépôt supérieur de l'ordre de 5 à 20

Bassoullet P., Verney R., Kervella Y., Kervella S., Jestin H., Voineson G. - Utilisation d'un altimètre ALTUS pour l'étude des corrélations avec les caractéristiques de vagues et les interfaces de dépôt

mm. Sur le terrain, cette précision de la mesure reste pour le moment tributaire de l'identification des faciès, la célérité du son étant pour partie, dépendante de ceux-ci.

Si de nombreuses expérimentations s'avèrent encore nécessaire pour constituer une "classification type" en fonction des signaux reçus par l'ALTUS, néanmoins ces premiers résultats, concernant la détermination des types de faciès, sont prometteurs.

Les développements futurs envisagés du système ALTUS portent (i) sur les possibilités d'enregistrer des signaux de meilleure qualité, (ii) sur l'utilisation d'un algorithme de classification qui soit validé sur un nombre important de faciès sédimentaires, apportant ainsi une contribution à la détermination de la nature des dépôts superficiels. Toutefois une validation par prélèvements *in situ* restera nécessaire.

## VI REFERENCES

- [1] Jestin, H., Bassoullet, P., Le Hir, P., L'Yavanc, J., & Degres, Y. (1998). - Development of ALTUS, a high frequency acoustic submersible recording altimeter to accurately monitor bed elevation and quantify deposition or erosion of sediments. *Oceans'98*, Nice, France. *Conference Proceedings*, 1/3, 189-194.
- [2] Bassoullet, P., Le Hir, P., Gouleau, D. & Robert, S. (2000). - Sediment transport over an intertidal mudflat: field investigations and estimation of fluxes within the "Baie de Marennes-Oleron" (France). *Continental Shelf Research*, 20 (12-13), 1635-1653.
- [3] Deloffre, J., Verney, R., Lafite, R., Lesueur, P., Lesourd, S. & Cundy, A. B. (2007). - Sedimentation on intertidal mudflats at the mouth of macrotidal estuaries: rhythms and preservation. *Marine Geology*, 241, 19-32.
- [4] Verney, R., Deloffre, J., Brun Cottan, J. C. and Lafite, R. (2007). - The effect of wave-induced turbulence on intertidal mudflats: Impact of boat traffic and wind. Application to the macrotidal Seine estuary (France). *Continental Shelf Research*, 27, 594-612.
- [5] Soulsby, R. L. (1997). - Dynamics of marine sands. A manual for practical applications. London, Thomas Telford, 249 p.
- [6] Verney, R., Voineson, G., Jestin, H., Bassoullet, P. et Le Hir, P. (2009).- Laboratory investigation of sediment bed features with a submersible acoustic echosounder: the ALTUS system. *INTERCOH'09*, Rio de Janeiro, Brésil, 3-8 May, abstracts book, 185-186.

## « Un nouveau chapitre de la thèse »

### Valorisation des compétences des docteurs

Youen KERVELLA

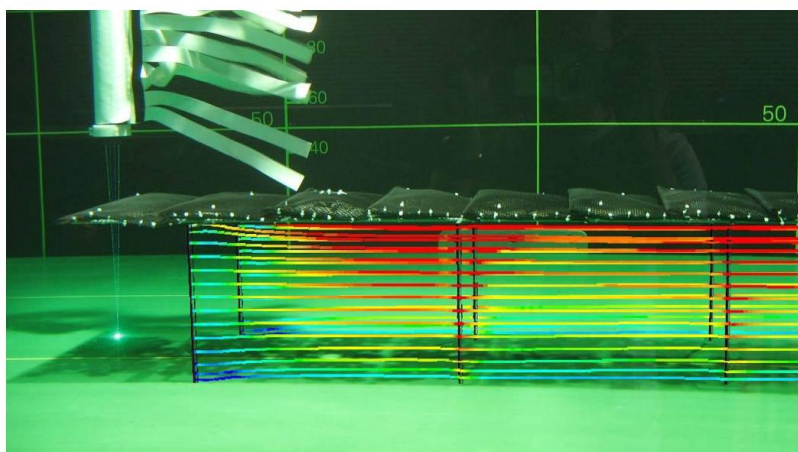
Ecole doctorale SIMEM

Laboratoire DYNECO/PHYSED, centre Ifremer de Brest – Laboratoire  
M2C Caen, UMR CNRS 6143

Mentor ABG : Laurence VARIN

**Thèse : « Impact des installations ostréicoles sur  
l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire »**

*Permettre aux institutionnels de mieux décider de l'emplacement et de l'orientation  
des futures concessions ostréicoles.*



Encadrants : Florence CAYOCCA (Ifremer), Patrick LESUEUR (M2C Caen)

Date de soutenance prévue : décembre 2009

## Cadre général et enjeux de votre thèse

### Présentation succincte :

Les tables à huîtres constituent des obstacles artificiels perturbant l'écoulement des courants de marée et la propagation des vagues. Il en résulte des modifications du transport sédimentaire qui peuvent entraîner des envasements locaux très prononcés et menaçant pour l'activité ostréicole. Ces constats ne sont pas récents (thèse de Sornin, 1981), mais à l'heure actuelle aucune étude précise des modifications hydrodynamiques inhérentes à ces installations n'a été réalisée.

Ma thèse vise donc à déterminer cet impact des structures ostréicoles sur l'hydrodynamique (vagues et courants) et sur la dynamique sédimentaire, en s'appuyant sur des mesures *in-situ*, des mesures en bassin et des modèles numériques.

Ce projet de thèse doit permettre de quantifier les effets des tables ostréicoles sur la circulation locale, à petite échelle spatiale, de déterminer leur domaine d'influence et d'évaluer les modifications morphodynamiques induites à l'échelle d'une baie, afin à terme, de prendre en compte ces structures dans un modèle de plus grande résolution spatiale et de proposer des solutions cohérentes d'aménagement aux professionnels du secteur.

Dans un futur proche, cette thèse contribuera donc à permettre à la fois une gestion intégrée du domaine public maritime et le développement durable des activités ostréicoles.

### Votre thèse dans son contexte :

Cette thèse s'inscrit, à l'échelle de mon laboratoire, dans le projet global « Mouvements sédimentaires », qui vise à répondre aux questions relatives à l'évolution de la zone côtière et au transport des particules fines. En France, l'Ifremer étant le seul organisme travaillant sur la problématique de ma thèse, il n'y a pas à proprement parler de concurrence. Sur un plan international, des équipes notamment japonaises et néo-zélandaises mènent des recherches, auxquelles je fais bien entendu régulièrement référence, sur des thématiques se rapprochant de mon projet de thèse.

De nombreuses compétences scientifiques sont mises à la disposition de ce projet de thèse par le biais de collaborations avec des équipes des différents centres Ifremer ainsi que des équipes universitaires (Caen et Le Havre notamment). D'autre part, des moyens techniques (instruments et facilités de mesures) et humains importants sont mis en œuvre lors des différentes missions de mesures *in-situ* et expérimentales.

### Vous dans ce contexte :

Après un Master 2 recherche en Physique de l'Océan et désirant poursuivre mes études après un stage m'ayant donné goût à la recherche, c'est tout naturellement que je me suis dirigé vers une thèse de doctorat.

Ce sujet relatif à la dynamique des écosystèmes côtiers et à l'impact anthropique sur ces écosystèmes, ainsi que les laboratoires d'accueil reconnus, ont conforté ma volonté de travailler sur l'environnement marin et de contribuer à la préservation d'un patrimoine écologique et économique.

## Déroulement, gestion et coût de votre projet

### Préparation et cadrage du projet :

Un projet de thèse est en soi une prise de risque ; tout sujet scientifique de recherche étant par nature « aventureux ». Les méthodes d'analyses de succès ou de risques habituellement employées en bureau d'étude sont ici inapplicables et ont donc été proscrites lors de la préparation du projet. La seule stratégie de maîtrise de risques, ou en quelque sorte le « plan B », était au vu du caractère pléthorique du sujet, de diminuer le volume de travail par rapport aux prévisions initiales. Lors de l'élaboration du projet par mes encadrants, son intitulé était « Impact des installations conchyliques sur la dynamique sédimentaire ». Les conditions du bon déroulement de ce projet passaient par un cadrage, basé sur mes avancées et conclusions, qui n'a laissé que 30 % du sujet initial, afin de privilégier et de bien traiter certains aspects (évincement des installations mytilicoles et focalisation sur l'hydrodynamique).

Impact de cette restriction : seulement 50 % des partenaires scientifiques initialement identifiés ont participé à mon projet de recherche. Au fil de la thèse et de l'avancée des travaux, de nouveaux axes de travail se sont dégagés et ont donné naissance à de nouvelles collaborations avec d'autres équipes de l'Ifremer ou avec des laboratoires universitaires de recherche, comme le Laboratoire de Mécanique, Physique et Géosciences du Havre pour des campagnes de mesures dans son canal à houles. Il me reste maintenant à identifier plus

précisément les futurs partenaires qui, à l'instar de la station Ifremer de Port en Bessin (Calvados), sont demandeurs de ce genre de travaux, ayant en effet une forte interaction avec les instances professionnelles locales.

Pour ce qui est des partenaires financiers, la région de Basse-Normandie participe pour moitié à ma bourse de thèse, du fait des nombreuses applications potentielles dans cette région (forte demande des conchyliculteurs bas-normands).

J'ai aussi bénéficié, à ma demande, du soutien financier occasionnel de la Région Bretagne pour participer à une conférence se déroulant en Chine.

En ce qui concerne les aspects contractuels, l'Ifremer garde la propriété intellectuelle de tous les résultats issus de mon projet de thèse. Mais ces résultats, d'intérêt public, ne souffrent pas de concurrence et n'entraînent pas, de par leur publication, de conséquences directes néfastes pour les professionnels de la conchyliculture (ostréiculture + mytiliculture) ; il n'y a donc aucune entrave à leur diffusion internationale. Je suis par contre tenu à une obligation de discrétion et de secret professionnel pour tout ce qui a trait aux inventions, créations ou « savoir-faire » dont j'aurai connaissance du fait de mes activités.

### **Conduite du projet:**

Le début de la thèse passe forcément par une phase d'identification des publications relatives à mon sujet ou divers rapports scientifiques existant et par la maîtrise des logiciels informatiques adéquats. Je n'ai volontairement pas consacré 2 ou 3 mois à cette phase en décomposant mon projet de thèse en plusieurs parties et en réalisant en temps voulu une synthèse bibliographique spécifique à chacune de ces parties (6 parties et 10 jours de bibliographie par partie).

Il est indispensable dans toute conduite de projet, de mettre en place une architecture décisionnelle afin de fixer des critères de faisabilité, en terme de temps ou de qualité. Ainsi, lors des premiers mois de la thèse, le premier réflexe a été de mettre en place un comité de pilotage de thèse. Ce comité de pilotage, composé de mes deux encadrants auxquels s'ajoutent trois chercheurs compétents dans les domaines d'application de ma thèse, se réunit à une fréquence semestrielle.

Les réunions se déroulent sur une journée et se décomposent en deux phases : une phase de présentation des travaux où je joue le rôle de pilote en explicitant mes dernières avancées, puis une phase de discussion. Les réunions se terminent sur un temps de conclusion où des réorientations ou des redéfinitions du sujet (comme la modification du titre initial du sujet) sont abordées. Certaines difficultés peuvent aussi être évoquées lors des réunions de ce comité, comme la nécessité d'un matériel informatique approprié, l'achat d'une licence pour un certain logiciel ou encore le besoin d'un suivi spécifique ou d'une formation pour la prise en main d'un outil..

Un compte-rendu est dressé à l'issue de chaque réunion et m'est très utile pour digérer cette journée riche en critiques.

Tout en étant « cadré » par ce comité, il m'est laissé une grande liberté de décision, tant au niveau de la gestion de mon temps de travail que de la planification de missions expérimentales ou *in-situ* et donc de la gestion des relations avec les partenaires scientifiques.

### **Evaluation et prise en charge du coût du projet :**

Montants en euros TTC

	Nature de la dépense	Détails *		Coûts totaux (euros TTC)			
				Nombre d'unités	Coût unitaire moyen	Quote-part utilisation	Total
<b>1</b>	<b>Ressources Humaines</b>						
1.1	Doctorant	Salaire brut	Charges	36	2833		101988
1.2	Encadrant 1	Salaire brut	Charges	8	8618		68944
1.3	Prime Encadrement						
1.4	Encadrant 2	Salaire brut	Charges				
1.5	Prime Encadrement						
1.6	Autre personnel (hors sous-traitance)	Salaire brut	Charges	3	5059		15177

1.7	Sous-traitance		stagiaires	12	810		9720
	<b>Sous-total</b> Ressources Humaines						195829
<b>2</b>	<b>Consommables</b>						
2.1	Fournitures expérimentales						
2.2	Fournitures de bureau						
2.3	Autres achats						
	<b>Sous-total</b> Consommables						
<b>3</b>	<b>Infrastructures</b>						
3.1	Entretien, gardiennage, secrétariat						
3.2	Loyers des locaux	Loyer brut	Charges locatives				
3.3	Electricité, eau, chauffage, ... (si non inclus dans les charges locatives)						
3.4	Autres						
	<b>Sous-total</b> Infrastructures + consommables + documentation et communication						123372,27
<b>4</b>	<b>Matériel (amortissements)</b>						
4.1	Matériel d'expérimentation (dont les ordinateurs et logiciels spécialisés)	Taux d'amortissement	360000			0,06	20160
4.2	Ordinateur de bureau	Taux d'amortissement	2000	1		1	2000
4.3	Logiciels de bureau	Taux d'amortissement	3000	1		1	3000
4.4	Autre	Taux d'amortissement					
	<b>Sous-total</b> Matériel						25160
<b>5</b>	<b>Déplacements</b>						
5.1	Missions en France	Transport	Hébergement + autres frais	30	110		3300
5.2	Missions à l'étranger	Transport	Hébergement + autres frais	1	2464,19		2464,19
5.3	Congrès en France	Transport	Hébergement + autres frais	1	800		800
5.4	Congrès à l'étranger	Transport	Hébergement + autres frais				
	<b>Sous-total</b> Déplacements						6564,19
<b>6</b>	<b>Formation</b>						
6.1	Formations	école d'été		1	720		720
6.2	Autres frais (Inscription à l'Université, Sécurité Sociale étudiante, etc.)						



	<b>Sous-total</b> Formation						720
<b>7</b>	<b>Documentation et communication</b>						
7.1	Affranchissements, Internet, téléphone						
7.2	Publicité, communication, impressions	Direct	Sous-traitance agence				
7.3	Documentation (périodiques, livres, bases de données, bibliothèque, etc.)						
7.4	Autres						
	<b>Sous-total</b> Documentation et communication						
<b>8</b>	<b>Charges financières (intérêts des emprunts)</b>						
	<b>Sous-total</b> Charges financières						
<b>9</b>	<b>Charges exceptionnelles</b>						
	<b>Sous-total</b> Charges exceptionnelles						
<b>10</b>	<b>TOTAL</b>						<b>351645,49</b>

En ce qui concerne les ressources humaines, hormis mes 36 mois de bourse de thèse, mon directeur de thèse basé à Caen a consacré environ 1 mois à mon projet, mon encadrante Ifremer 3 mois, et les autres chercheurs du laboratoire environ 2 mois en temps cumulé. A cela il convient d'ajouter les temps de travail « mission » : les campagnes d'essais en bassin à Boulogne-sur-Mer où 2 chercheurs et 1 technicien ont travaillé chacun 1 mois avec moi, et les campagnes de mesures *in-situ* en baie du Mont Saint-Michel où 2 techniciens ont collaboré à hauteur d'un mois chacun. Soit au total, 8 mois de temps chercheur et 3 mois de temps technicien consacrés à ma thèse. A cela vient s'ajouter les 2 stages de 6 mois que j'ai encadré lors de mes deuxième et troisième années de thèse.

Pour les dépenses associées au projet, les catégories « consommables », « infrastructures » et « documentation et communication » sont regroupées et représentent 63% de la masse salariale (sous total Ressources Humaines).

Quant au matériel, que ce soit pour le matériel d'expérimentation, l'ordinateur ou les logiciels, l'amortissement se fait en 3 ans. Pour le matériel d'expérimentation, le calcul est bien sûr fait au prorata du temps d'utilisation.

Ce qui nous amène à un coût total du projet de thèse de 351645,49 euros. La découverte de ce chiffre entraîne certaines réactions, que ce soit en tant que particulier ou en tant que chercheur. Un institut comme l'Ifremer peut la supporter mais on imagine assez difficilement comment une petite entreprise peut mener des recherches similaires. Ainsi, on se rend compte de l'incidence de l'endroit où l'on se trouve. Lors de la phase de pilotage d'un projet, il faut vraiment identifier où se situent les vigilances à avoir afin que l'investissement ait du sens. Au vu du montant des dépenses liées aux ressources humaines, on se rend compte aussi du niveau d'exigence auquel on doit s'astreindre vis-à-vis des acteurs du projet.

Cela donne d'autre part à réfléchir quant à la création d'une entreprise et des moyens à investir pour la bonne conduite et donc la réussite d'un projet.

## Compétences, savoir-faire, qualités professionnelles et personnelles illustrées par des exemples

De par mon sujet de thèse et mon laboratoire d'accueil, mes compétences sont inhérentes au domaine marin et plus particulièrement aux environnements côtiers. Au cours de mon projet, je me suis approprié différents savoirs et savoir-faire et suis maintenant à même de conduire des expertises scientifiques telles que les études d'impact de structures immergées (hydroliennes, éoliennes, structures de pêche, ..) ; à partir d'un besoin identifié, je sais mettre en place une phase d'investigation pour établir l'état des lieux du sujet traité, puis mobiliser mes compétences scientifiques, techniques, relationnelles et managériales afin de conduire un projet.

J'ai évidemment acquis de nombreuses connaissances sur les domaines propres à ma thèse que sont l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire. Mais j'ai surtout acquis énormément de savoir-faire au fil de mes missions *in-situ* ou de mes mesures expérimentales : outre l'organisation de mission sur laquelle je reviendrai par la suite, j'ai appris à préparer et configurer différents appareils de mesures, à les installer sur le terrain ou dans un bassin, décharger les résultats de mesures, les analyser et modifier les protocoles de mesures si besoin est, comparer ces mesures avec des résultats de modèles numériques, ... Je suis évidemment bien conscient qu'un pilote de projet ne réalise pas forcément tout ce travail d'ingénierie que je viens de citer. Mais je pense que la capacité à construire une architecture de projet passe par la connaissance et la maîtrise de tous ces aspects techniques.

Au niveau des compétences méthodologiques, mon projet de thèse ainsi que l'autonomie dont j'ai bénéficié, m'ont permis de gérer l'organisation d'un projet, de la réflexion précédant les premières investigations jusqu'à l'exploitation des résultats et même leur valorisation. Prenons l'exemple de la mission « mesures hydrodynamiques en baie du Mont Saint-Michel », que j'ai menée lors de ma première année de thèse ; à travers cette mission, j'ai tout de suite été confronté à une conduite de projet :

J'ai dû répondre à une sorte de « cahier des charges » propre à toute mission *in-situ* : gestion des contraintes physiques (coefficients et horaires de marées), humaines (suffisamment de personnes disponibles pour mener à bien cette mission), matérielles (le nombre d'appareils de mesures n'est pas illimité, leur temps de mesure non plus), météorologiques (une dépression ou un anticyclone peuvent faire varier le niveau de la mer et donc modifier notre approche du terrain). J'ai donc planifié ma mission en tenant compte de tous ces éléments.

En ce qui concerne la gestion des ressources humaines, j'ai recruté cinq personnes expérimentées (chercheurs et techniciens en lien avec les tâches définies dans le projet) afin de constituer deux équipes de trois. J'ai animé une équipe, l'animation de la seconde équipe étant réalisée par mon encadrante. L'expérience de mes collaborateurs m'a permis d'acquérir de nouvelles techniques *in-situ*. J'ai donc eu, sur le terrain, un rôle participatif, tout en ayant un pouvoir décisionnel final.

Au niveau des ressources techniques, j'ai mobilisé les moyens de mon laboratoire. J'ai aussi fait appel à mes relations professionnelles extérieures afin d'obtenir rapidement un appareil supplémentaire.

J'ai ensuite fait preuve de compétences relationnelles en communiquant auprès des professionnels du secteur, en l'occurrence les ostréiculteurs de la baie, de notre venue et de la présence de notre matériel près de leurs structures pendant un mois, et en obtenant gracieusement leur aide sur le terrain (transport, guide, facilité d'installation). Ces professionnels sont ainsi devenus, par leur intérêt, des partenaires dans le cadre de mon projet. J'ai aussi démontré mes capacités en terme de communication en prévenant les Affaires Maritimes et la direction des pêches de notre mission et en diffusant cette information aux utilisateurs de la baie du Mont Saint-Michel sous forme d'affiches. J'ai dû faire face à des problèmes de délai de fabrication de matériel de balisage, qui m'était indispensable pour le bon fonctionnement de la mission, qui ont entraîné une phase de négociation difficile à gérer mais qui a abouti dans mon sens.

L'organisation et la planification étant terminées, j'ai piloté la mission : phase d'installation, de suivi, de relevé du matériel et d'évaluation par le biais de la rédaction d'un compte rendu final.

J'ai organisé d'autres missions par la suite, que ce soit sur le terrain ou dans des structures d'essais (canal ou bassin), en profitant de cette première expérience. Ces différentes missions m'ont permis d'acquérir de nombreuses compétences ou d'enrichir mon expérience en terme de gestion du travail en équipe, du temps de travail, des négociations, ...

Mon projet de thèse m'a aussi obligé à une certaine rigueur au point de vue administratif. Il a fallu que je gère des fiches de travail, que j'écrive des rapports de mission, que j'utilise des outils organisationnels (doodle, ...) et que je développe mes compétences linguistiques (en anglais) pour écrire des articles scientifiques ou participer à des conférences internationales.

En ce qui concerne mes qualités personnelles, outre mes qualités d'organisation, je pense avoir fait preuve au cours de ce projet de thèse de créativité, en proposant des méthodes de mesures et de modélisation innovantes, avoir démontré ma capacité d'analyse, de synthèse et de valorisation à travers mes différents exposés et publications, mais aussi mon aptitude à l'encadrement, par le biais des 2 stages ingénieur (bac +4 ou +5) que j'ai proposé et encadré lors de mes deuxième et troisième années de thèse ; sans oublier un savoir être indispensable au bon fonctionnement d'une équipe de recherche.

Je me suis également construit un réseau de partenaires scientifiques et techniques au sein même des unités de l'Ifremer, mais aussi dans des laboratoires de recherche universitaires ou des organismes publics tels que le Muséum National d'Histoire Naturelle. Ce réseau me sera très certainement fort utile dans la suite de ma carrière.

Enfin, tout au long de cette thèse, je me suis efforcé de transférer au mieux mes compétences en donnant des cours à des élèves en dernière année d'école d'ingénieurs, ou en les vulgarisant, que ce soit par le biais de



posters, de communications orales, d'exposés à un public de tout âge et souvent novice dans mon domaine d'activité (intervention à Brest 2008 par exemple), de petites expériences scientifiques partagées avec les enfants (Association Les Petits Débrouillards : <http://www.lespetitsdebrouillards.org>), ...

## Résultats, impact de la thèse

### Impact de la thèse :

Pour mon laboratoire d'accueil, les résultats de mon projet de thèse ont permis, via une meilleure connaissance des phénomènes hydrodynamiques se déroulant dans ou à proximité des installations ostréicoles, d'améliorer les modèles numériques existants et de les valider grâce aux nombreuses mesures que j'ai acquies, de créer de nouveaux outils de modélisation expérimentale, analytique ou numérique, et enfin de suggérer de nouvelles pistes à explorer dans des futures études. D'un point de vue plus global, c'est-à-dire pour l'organisme de recherche auquel j'appartiens (Ifremer), ces résultats vont permettre de proposer des solutions cohérentes d'aménagement aux ostréiculteurs et donc à terme de permettre le développement durable des activités ostréicoles.

En ce qui concerne les partenaires de mon projet de thèse, mon sujet, au carrefour de plusieurs disciplines, aura eu le mérite de faire naître de nouvelles collaborations, internes ou non, et par ce biais de mettre en commun des connaissances, des savoir-faire ou des infrastructures propres à chaque discipline. Mon projet de thèse aura aussi permis de valoriser des résultats en les rendant accessibles à chaque communauté par l'intermédiaire de communications écrites ou orales.

Pour la recherche sur les environnements côtiers ou pour la recherche scientifique dans sa globalité, ce projet de thèse aura apporté sa pierre à l'édifice sur un sujet peu traité auparavant, en apportant des critères sélectifs (orientation des concessions par rapport aux vagues et aux courants, géométrie des concessions, ...) aux décideurs pour permettre ou non d'octroyer de nouvelles concessions ostréicoles, dans le but de limiter leurs impacts et de pérenniser un environnement.

D'un point de vue sociétal, l'impact est bien sûr direct puisque les avancées vont être répercutées au niveau des professionnels du secteur sous la forme de conseils sur les futurs aménagements ou même sur les méthodes de culture.

### Impact personnel du « Nouveau chapitre de thèse » :

La rédaction de ce *Nouveau Chapitre de la thèse* m'aura permis de faire un bilan de mes compétences, qu'elles soient scientifiques, techniques, relationnelles, pédagogiques ou managériales, acquises durant les trois années de mon projet de thèse.

Par son biais, je me suis aussi rendu compte de l'importance des moyens humains, qui sont le premier point moteur de la réussite d'un projet, et du coût de la recherche et plus particulièrement d'une thèse. Je pense qu'il est indispensable de garder à l'esprit cet aspect financier, notamment si l'on veut un jour créer son entreprise ou donner du sens à l'investissement d'un projet.

Enfin, il m'aura permis de me questionner sur l'adéquation de ces compétences avec les attentes du milieu professionnel.

### Pistes professionnelles :

A la lumière de l'analyse de mon projet et de mes compétences, je pense que plusieurs pistes s'ouvrent à moi :

- collaborer dans un bureau d'étude spécialisé sur les études d'impact en environnement marin (comme *In Vivo* à Quimper ou *Créocéan* à La Rochelle), où il me faudra démontrer ma rigueur, mon adaptabilité et surtout mon efficacité

- créer une entreprise, un bureau d'étude. Il faudra alors employer des compétences managériales, organisationnelles et relationnelles en plus des compétences scientifiques

- être maître de conférences dans une université, c'est-à-dire être à la fois enseignant et chercheur. Mon goût pour la recherche ainsi que pour la pédagogie seraient satisfaits

Dans ces différents cas, mon secteur d'intervention privilégié serait le littoral breton. En effet, outre le fait d'être natif de cette région, je crois en le fort potentiel de cette région, possédant un domaine maritime immense avec ses trois façades exposées à la mer. J'aimerais donc exploiter ce potentiel qui, notamment à l'heure l'émergence des énergies renouvelables (hydroliennes, éoliennes, ...), devrait être dans l'avenir porteur en terme d'emplois.





## **IMPACT DES INSTALLATIONS OSTREICOLES SUR L'HYDRODYNAMIQUE ET LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE.**

### **Résumé**

Les structures ostréicoles constituent des obstacles artificiels pouvant perturber l'écoulement des courants de marée et la propagation des vagues, et ainsi modifier le transport sédimentaire. Il en résulte des envasements locaux parfois très prononcés et menaçants pour l'activité ostréicole.

L'impact des structures sur les forçages hydrodynamiques, vagues et courants, est donc évalué à différentes échelles spatiales par le biais de mesures *in-situ*, de modélisation expérimentale et de modélisation numérique. Ces différentes approches ont permis de montrer qu'en champ proche, les courants sont modifiés en termes d'intensité et de direction alors qu'il n'existe pas de modification significative des vagues. A l'échelle d'un parc ostréicole en revanche, un ralentissement significatif des courants et une atténuation importante des hauteurs de vagues sont mesurés.

D'un point de vue sédimentaire, nous avons observé sous une table à huîtres une turbidité plus importante ainsi qu'une évolution altimétrique du sédiment moins perturbée qu'à proximité. La diminution des contraintes de cisaillement sur le fond, due à l'atténuation des vagues par le parc, entraîne une réduction du potentiel érosif des vagues, ce qui se traduit par une granulométrie différente et une tendance à l'envasement dans la partie aval du parc vis-à-vis de la propagation des vagues.

Une modélisation numérique de la Baie du Mont Saint-Michel a été mise en œuvre et calibrée par nos mesures *in-situ*. Elle a montré que l'impact des structures sur la sédimentation à long terme est essentiellement local et est donc négligeable à l'échelle de la baie.

### **Mots clés**

Tables à huîtres, envasement, courants, vagues, sédiment, impact.

## **THE IMPACT OF OYSTER FARMING STRUCTURES ON HYDRODYNAMICS AND SEDIMENT DYNAMICS.**

### **Abstract**

Oyster farm structures represent artificial obstacles which can disturb tidal currents and wave propagation, and thus modify sediment transport patterns. Local deposition may result from these modifications, in proportions that may threaten the oyster farming.

The impact of structures on hydrodynamics, waves and currents, is investigated at different spatial scales by means of *in-situ* measurements, experimental tests and numerical modeling. These different approaches show that in the near-field, tidal currents are modified in terms of intensity and direction but there is no significant impact on the waves. On the other hand, at the scale of the oyster farm, a significant reduction of the current velocities and a large wave height attenuation are recorded.

From a sedimentary point of view, higher turbidity levels and a smoother evolution of the sediment altimetry are observed under an oyster table than in the adjacent alleys. The bottom shear stress reduction, due to wave attenuation by the farm, induces a decrease of the wave erosive potential, which leads to a different sediment granulometry and a deposition trend in the downstream part of the farm (with regards to wave propagation).

A numerical sediment transport model of Mont saint-Michel Bay is used and calibrated by our *in-situ* measurements. It shows that the impact of structures on long term sedimentation is essentially local and is negligible at the scale of the bay.

### **Keywords**

Oyster tables, silting up, currents, waves, sediment, impact.